

## 太湖流域设计暴雨时空分布对太湖洪水位影响分析\*

徐天奕\*\*

(太湖流域管理局水利发展研究中心, 上海 200434)

**摘要:** 太湖是太湖流域最大的调蓄水体,合理地推求太湖流域设计暴雨,对于太湖设计洪水位确定非常重要. 针对近年来太湖流域变化环境造成的暴雨特性及产汇流机制的变异,采用水文水动力学模型模拟分析了现状条件下太湖流域设计暴雨控制时段及时空分布对太湖洪水位影响. 结果表明,以 30、60、90 日为控制时段的设计雨量与太湖最高洪水位关联密切,控制时段低于 30 日的暴雨时程分配对太湖最高洪水位基本没有影响. 当设计暴雨中心位于太湖上游区域时,模拟的太湖洪水位具有明显升高的趋势,表明太湖洪水位对上游暴雨更为敏感. 分析了 1999、2016、2020 年暴雨为典型的设计暴雨场景,结果表明,暴雨时程分配对太湖洪水位影响显著,主雨峰位于暴雨后期的设计暴雨可以造成更高的太湖洪水位. 从太湖防洪安全考虑,采用 30、60、90 日为控制时段,暴雨中心位于上游,且雨峰位于暴雨过程后期的设计暴雨推求太湖洪水位是合适的. 建议将 2016、2020 年暴雨过程列入太湖设计暴雨计算的备选典型,并作进一步分析论证.

**关键词:** 太湖; 洪水位; 设计暴雨; 典型暴雨; 控制时段; 空间分布; 时程分配

## Influence of spatio-temporal distribution of design storm on Lake Taihu flood level\*

Xu Tianyi\*\*

(Water Conservancy Development Research Center of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, P.R. China)

**Abstract:** Lake Taihu is the largest area for water storage in the Taihu Basin. How to reasonably derive the design storm is important for determining the flood level of Lake Taihu. Aiming at the variation of storm characteristics and mechanism of runoff yield under changing environments in recent years, the influence of spatio-temporal distribution of the designed rainstorm on the flood level of Lake Taihu under current conditions was simulated and analyzed using a hydrological and hydrodynamic model. The results show that the design storm with 30, 60, and 90-day rainfall durations has more relevance to the highest flood level of Lake Taihu. The design storms with a control duration of less than 30 days have little effect on the the highest level of Lake Taihu. When the designed rainstorm center is located in the upstream region of Lake Taihu, the flood level of Lake Taihu has a significant upward trend, indicating that the flood level of Lake Taihu is more sensitive to the rainstorm of which center is located in the upper basin. The rain that occurred in 1999, 2016, and 2020 were analyzed as typical design rainstorm schemes. The results show that the rainfall process has a significant impact on the flood level of Lake Taihu. Moreover, the results indicate that the majority rain peak, which occurs at the later stage of the rainfall, may cause a higher flood level of Lake Taihu. Considering the security of flood control, it is appropriate to inquire into the flood level of Lake Taihu using the design storm with control periods are 30, 60, and 90 days, assuming that the rainstorm center is located in the upper basin, and the rain peak occurs at the later stage of the rainstorm. It is suggested to involve the rain process in 2016 and 2020 as an alternative typical calculation of design storm of Taihu Basin, and to make further analysis and demonstration.

**Keywords:** Lake Taihu; flood level; design storm; typical storm; control duration; spatial distribution; temporal distribution

太湖是我国五大淡水湖之一,位于太湖流域中上部区域,水面面积 2338 km<sup>2</sup>,是太湖流域主要的水源地,也是流域洪水最大的调蓄水体,在太湖流域防洪治涝体系中具有不可替代的重要作用,治理和保护太湖

\* 2021-09-21 收稿; 2021-12-10 收修改稿.

国家重点研发计划项目(2018YFC1508200)和上海市科学技术委员会科研项目(19DZ1201500)联合资助.

\*\* 通信作者; E-mail: tyiss@126.com.

是流域防洪治涝重要任务<sup>[1-3]</sup>。如何合理确定太湖设计洪水位对于太湖大堤安全及太湖流域防洪十分关键。由于太湖流域人类活动影响显著<sup>[4-5]</sup>,太湖水位资料不能满足一致性,无法采用水位频率计算方法推求太湖设计洪水位,只能采用由流域设计暴雨推求太湖洪水位的间接途径。因此,科学合理地推求太湖流域设计暴雨,对于太湖设计洪水位确定非常重要。

太湖流域设计暴雨是否等价于太湖设计暴雨是一个值得讨论的议题。在《太湖流域防洪规划》中,100年一遇设计暴雨是针对整个太湖流域,考虑到包括太湖在内的七大水利分区的流域整体洪水水情<sup>[6]</sup>,由此推求的太湖水位的设计频率不够明确。近年来,随着频频出现的太湖高水位,一些专家学者对太湖大堤是否能抵御太湖100年一遇洪水位提出疑问,这对太湖流域防汛工作带来较大压力,也为流域防洪规划、建设与管理造成不少困惑。

太湖流域是我国水情特别复杂的平原河网地区,由于流域七大分区水系互通,水流顺逆不定,又受水利工程布局 and 调度影响,太湖入湖和出湖径流路径很复杂,太湖上游浙西山区洪水可从东苕溪分流进入下游杭嘉湖平原,上游湖西区则有部分区域径流直接流入下游武澄锡虞区,当武澄锡虞区和阳澄淀泖区水位较高时,区内洪水也可以排入太湖。因此,太湖上下游区域暴雨对太湖水位影响程度不像一般流域那样明确,必须根据暴雨时空分布状况模拟分析。目前太湖流域各类规划中主要以《太湖流域防洪规划》中提出的南部区域雨量与流域同频率的1999年型设计暴雨,以及北部区域雨量与流域同频率的1991年型设计暴雨为主<sup>[7-8]</sup>。新的下垫面条件下所采用的设计暴雨时空分布对于太湖洪水位计算是否合理需要深入研究。

自太湖流域第一轮治理工程实施后,随着太湖流域经济社会快速发展,流域的土地利用、水利工程建设 and 水利调度模式有了很大的变化<sup>[9-11]</sup>,对太湖流域产汇流特性产生显著影响,流域暴雨洪水位响应时间缩短,水位上涨速率加快<sup>[12-15]</sup>。近期有专家认为造成太湖流域高水位的暴雨响应时间已经低于30天。因此,上一轮流域防洪规划中设计暴雨计算中采用的30、60、90日设计暴雨控制时段是否合适需要加以论证。

根据太湖流域历史暴雨资料分析,自1949—2010年,造成太湖流域特大洪涝的历史暴雨有1954、1991、1999年暴雨,这些年份的暴雨时空分布有着明显差异,但均造成太湖持续高水位<sup>[16-17]</sup>。近年来,随着全球气候变化和太湖流域快速城市化的影响,太湖暴雨洪水特性产生一定的变异<sup>[18-20]</sup>,尤其是近期2016、2020年的暴雨,其时程分配与1954、1991、1999年暴雨存在明显差异,同样造成太湖高水位,受到了广泛的关注<sup>[21-22]</sup>。但在2015年前,特大暴雨雨型样本较少,有关太湖流域设计暴雨的时间分布研究受到制约,采用实测暴雨洪水资料的研究更少,且研究针对的对象多为河网区域,设计暴雨时间分布对太湖水体洪水位影响研究鲜有报道,与降雨空间分布相比影响程度是否更为显著,尚未做过系统分析。太湖流域与传统的山区闭合流域雨洪特点有很大差别,在其他地区研究规律未必适合太湖流域,因此,应该深入研究太湖流域暴雨的时程分配和空间分布对太湖洪水位的影响。

本研究针对设计暴雨计算中存在的问题,综合考虑太湖流域暴雨特性,选择合适的典型暴雨过程,系统分析设计暴雨控制时段、中心位置、时程分配特点,拟定设计暴雨各种时空分布场景,在太湖流域现状土地利用、水系分布、水利工程布局及调度模式基础上,通过水文水动力模型模拟各种设计暴雨场景下的太湖洪水位,分析设计暴雨的控制时段、时程分配和中心分布对太湖洪水位影响,以期太湖流域治理和规划工作中推求设计暴雨提供合理依据。

## 1 研究方法

### 1.1 设计暴雨时空分布场景的设定方法

1.1.1 不同控制时段设计暴雨推求 对太湖流域长时期的暴雨洪涝灾情分析,太湖流域特大洪涝灾情大部分出现在每年5—7月的梅雨期,其特点是降雨范围广、降水量大、雨期持续时间长,极易造成太湖持久的高水位<sup>[23-25]</sup>。长期研究表明,造成太湖较高洪水位的梅雨型暴雨,其主雨峰时间一般在30日左右,很少超过60日,30~60日的雨量对太湖洪水位的影响尤为显著。因此,《太湖流域防洪规划》设计暴雨计算中采用的控制时段为30、60、90日。

针对近年来太湖流域暴雨洪水响应时间缩短的趋势,为了分析设计暴雨最合适的控制时段,科学合理地制定太湖流域设计暴雨,更为准确地推求太湖设计洪水位,明确太湖大堤防洪安全标准,针对流域暴雨时

程分配特点和太湖的调蓄能力,选取7、15、30、60、90日作为备选的控制时段,组成各类不同组合控制时段的设计暴雨场景,以论证在现状条件下不同控制时段设计暴雨对太湖洪水位的影响。

根据太湖流域防洪规划需求,设计暴雨频率统一取100年一遇。7、15、30、60、90日控制时段对应的设计雨量分别为313.4、424.8、560.6、786.3、975.1 mm(采用太湖流域防洪规划报告中的数据)。

根据流域设计暴雨和典型暴雨的时段统计值,可由公式(1)推求对应于各场景的设计暴雨过程。

$$P_{p,j} = k_{t_i-t_{i-1}} P_{D,j} \quad k_{t_i-t_{i-1}} = \frac{X_{p,t_i} - X_{p,t_{i-1}}}{X_{D,t_i} - X_{D,t_{i-1}}} \quad (1)$$

式中,  $P_{p,j}$ 为流域第  $j$  日设计雨量(mm),  $P_{D,j}$ 为流域第  $j$  日典型雨量(mm),  $k_{t_i-t_{i-1}}$ 为降雨控制时段  $t_{i-1}$ 至  $t_i$ 之间各日雨量缩放系数,  $X_{D,t}$ 为流域  $t$ 时段典型雨量(mm),  $X_{p,t}$ 为流域  $t$ 时段设计雨量(mm)。

1.1.2 不同暴雨中心设计暴雨推求 根据太湖流域下垫面特点,水利工程布局,水系的相对闭合性,产汇流特性及暴雨空间分布规律和尺度,地区传统分区习惯等因素,太湖流域被分为浙西区、湖西区、太湖区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区、杭嘉湖区、浦东浦西区七大水利分区<sup>[26]</sup>,见图1。其中浙西区、湖西区、太湖区汛期暴雨径流基本汇入太湖,称之为太湖上游区域;太湖洪水经武澄锡虞区、阳澄淀泖区、杭嘉湖区、浦东浦西区排入长江及杭州湾,这4个区合称之为下游区域。全流域面积为36895 km<sup>2</sup>,其中上游区面积为16672 km<sup>2</sup>,下游区面积为20223 km<sup>2</sup>。



图1 太湖流域水利分区示意图

Fig.1 Schematic diagram of hydraulic regions in Taihu Basin

根据太湖流域防洪规划设计暴雨计算成果,流域上游和下游区域100年一遇设计暴雨时段雨量见表1。

表1 太湖上游和下游区域100年一遇设计雨量  
Tab.1 100-year-return-period rainfall in upstream and downstream regions of Lake Taihu

| 区域   | 面积/<br>km <sup>2</sup> | 30日雨量/<br>mm | 60日雨量/<br>mm | 90日雨量/<br>mm |
|------|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 上游区域 | 16671.9                | 602.3        | 842.0        | 1044.5       |
| 下游区域 | 20223.5                | 550.7        | 771.7        | 955.1        |

由于地形地貌和地理位置的降水效应,各水利分区的降雨特性存在差别,在流域(或区域)设计雨量已经确定的前提下,各分区逐日相应设计雨量可以按各时段多年平均雨量为权重加以分配,按公式(2)将流域(或区域)设计雨量分配到各水利分区。

$$P_{m,j} = P_{p,j} \frac{F\bar{X}_{m,t}}{\sum_{i=1}^n \bar{X}_{i,t} f_i} \quad (2)$$

式中,  $P_{m,j}$  为第  $m$  水利分区第  $j$  日相应设计雨量(mm),  $P_{p,j}$  为流域(或区域)第  $j$  日设计雨量(mm),  $F$  为流域(或区域)面积( $\text{km}^2$ ),  $\bar{X}_{i,t}$  为第  $i$  分区  $t$  时段雨量多年平均值(mm),  $f_i$  为第  $i$  分区面积( $\text{km}^2$ ),  $n$  为流域(或区域)分区数.

与流域暴雨同频率区域控制时段设计雨量采用太湖流域防洪规划设计成果,流域其它区域相应雨量采用公式(3)计算.

$$X_{B,t} = \frac{X_{p,t}F - X_{A,t}F_A}{F_B} \quad (3)$$

式中,  $X_{p,t}$  为流域时段  $t$  设计雨量(mm),  $X_{A,t}$  为与流域暴雨同频率区域时段  $t$  设计雨量(mm),  $X_{B,t}$  为流域其它区域时段  $t$  相应雨量(mm),  $F$  为流域面积( $\text{km}^2$ ),  $F_A$  为同频率区域面积( $\text{km}^2$ ),  $F_B$  为相应区域面积( $\text{km}^2$ ).

已知各时段设计雨量,与流域设计暴雨同频率区域或非同频率相应区域逐日雨量均可采用公式(4)计算.

$$P_j = k_{t_i-t_{i-1}} P_{D,j} \quad k_{t_i-t_{i-1}} = \frac{X_{t_i} - X_{t_{i-1}}}{\bar{X}_{D,t_i} - \bar{X}_{D,t_{i-1}}} \quad (4)$$

式中,  $P_j$  为与流域暴雨同频率区域(或相应区域)第  $j$  日设计雨量(mm),  $P_{D,j}$  为与流域暴雨同频率区域(或相应区域)第  $j$  日典型雨量(mm),  $k_{t_i-t_{i-1}}$  为同频率区域(或相应区域)控制时段  $t_{i-1}$  至  $t_i$  之间日雨量缩放系数,  $X_{t_i}$  为同频率区域(或相应区域)  $t_i$  时段设计雨量(mm),  $\bar{X}_{D,t_i}$  为同频率区域(或相应区域)  $t_i$  时段典型雨量(mm).

据此,可以拟定暴雨中心所在的区域与流域设计雨量同频率,其它区域雨量相应,组成相应的设计暴雨空间分布场景进行相关分析.

1.1.3 不同时段分配设计暴雨推求 根据太湖流域水文气象资料,造成太湖特高水位的暴雨均由梅雨所形成.自1950年以来,太湖最高水位的前5名按时间顺序分别为1954、1991、1999、2016、2020年,各年份最大30、60、90日雨量及太湖最高水位统计见表2.这些年份暴雨的时段雨量与时程分配不尽相同,可以作为分析不同时段分配的暴雨典型,据此推求出不同时段分配的设计暴雨场景,作为分析设计暴雨时段分配对太湖洪水水位影响的基础.由典型暴雨推求设计暴雨按公式(1)采用同频率放大法.

表2 典型年时段雨量及太湖最高水位

Tab.2 Rainfall for different duration and maximum level of Lake Taihu in typical years

| 典型年  | 30日雨量/<br>mm | 60日雨量/<br>mm | 90日雨量/<br>mm | 太湖水位/<br>m |
|------|--------------|--------------|--------------|------------|
| 1954 | 351.6        | 627.9        | 890.5        | 4.65       |
| 1991 | 489.1        | 678.8        | 824.4        | 4.79       |
| 1999 | 621.1        | 744.4        | 1044.1       | 4.97       |
| 2016 | 446.0        | 680.3        | 845.0        | 4.87       |
| 2020 | 492.2        | 734.6        | 836.0        | 4.79       |

## 1.2 太湖洪水水位模拟方法

流域产流及河网汇流计算采用太湖流域水文水动力数学模型,该模型由河海大学和太湖流域管理局共同研制,1990年代迄今一直应用于太湖流域水利规划、设计与管理工作<sup>[27-29]</sup>.近年来经过改进和完善,根据最新的下垫面、河道湖泊、水利工程资料进行细化,采用了流域历史及近期的多年降雨和相应水位资料进行率定,能够可靠地模拟流域产汇流和河网汇流规律,根据流域降水准确地推求太湖洪水水位过程.

根据太湖流域现状土地利用、水系分布、水利工程布局及调度方式,采用太湖流域数学模型,由设计暴雨场景可推求得太湖洪水水位过程.

1.2.1 模型原理与结构 太湖流域水文水动力模型分为降雨径流模块和水动力模块.降雨径流模块针对不同下垫面特征分别构建平原区、山丘区不同产汇流子模块.平原区按水面、水田、旱地、建设用地四类下垫面分别采用不同方法计算产流;山丘区采用新安江模型进行产汇流计算,同时考虑水库的调洪作用.降雨径流模块计算结果为水动力计算模块提供河道侧向入流和上游山区流量边界.

水动力模块主要通过求解描述河道水流运动的圣维南方程组,得到全流域平原区河网节点水位、河道断面流量等结果.水动力模块的计算步长为300 s.

1.2.2 参数分析与率定 模型选取了2016年和2020年梅雨期作为典型洪水时段进行模型参数率定.结果表明,太湖水位过程与实测值拟合较好,太湖计算最高水位与实测水位误差在1 cm.太湖水位率定结果见图2.

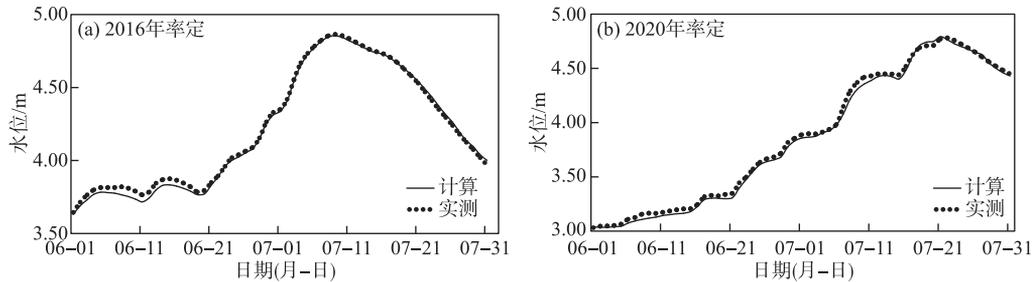


图2 太湖水位率定结果

Fig.2 Model validation results of water level of Lake Taihu

## 2 太湖设计暴雨时空分布对太湖水位影响分析

### 2.1 设计暴雨控制时段对太湖最高水位的影响分析

1999年汛期暴雨是太湖流域有雨量记录以来最大雨量,出现在梅雨期,造成太湖历史最高水位4.97 m,引发特大洪涝灾害。1999年暴雨中心主要位于流域南部区域,太湖区、杭嘉湖区、浙西区和浦东浦西区最大90日降水量均超过1000 mm,而流域北部湖西区、武澄锡虞区降水量相对较小。经考证,1999年流域最大30日和最大90日雨量重现期在200年左右,是太湖流域规划、建设和管理工作特别重视的暴雨洪水<sup>[30-32]</sup>,也是太湖流域防洪规划设计暴雨计算中采用的主要暴雨典型。因此,采用1999年最大90日雨量作为典型暴雨过程,根据控制时段100年一遇雨量设计值推求流域设计暴雨。

场景1-1:按照太湖流域防洪规划,设计暴雨计算的控制时段为30、60、90日,采用同频率缩放方法由典型暴雨推求设计暴雨。

场景1-2:考虑暴雨洪水响应时间的缩短,设计暴雨计算的控制时段为15、30、60日,采用同频率缩放方法由典型暴雨推求设计暴雨。

场景1-3:考虑更短历时暴雨对太湖洪水位的可能影响,设计暴雨计算的控制时段为7、15、30、60日,采用同频率缩放方法由典型暴雨推求设计暴雨。

表3 设计暴雨控制时段对太湖洪水位的影响  
Tab.3 Influence of design storm with different control durations on flood level of Lake Taihu

| 场景    | 太湖最高水位/m | 峰现日期 | 峰现时序 |
|-------|----------|------|------|
| 场景1-1 | 4.801    | 7月4日 | 第27日 |
| 场景1-2 | 4.799    | 7月4日 | 第27日 |
| 场景1-3 | 4.798    | 7月4日 | 第27日 |

各场景计算的太湖最高水位及相应出现时间见表3。根据3个场景不同控制时段设计暴雨场景对太湖洪水位模拟结果可以看出,太湖最高洪水位差别小于0.5 cm,峰现时间基本一致,说明太湖调蓄能力较强,30日以内短历时雨量分配对太湖最高洪水位及峰现时间影响并不明显。因此,在现阶段推求太湖本体的设计洪水位,采用30、60、90日作为设计暴雨的控制时段仍然是合适的。

按1999年典型暴雨过程,以30、60、90日作为控制时段得出的流域设计暴雨过程及模拟的相应太湖水位过程见图3和图4。

对于太湖流域河网或水利分区河道,由于调蓄能力远低于太湖,河道洪水位的敏感暴雨时段可能会更短,但如果兼顾到流域河网或分区,增加30日以下的控制时段推求设计暴雨也是合理的,且对太湖最高水位推求结果没有影响,这需要另外列题作进一步研究。

### 2.2 暴雨空间分布对太湖最高水位的影响分析

基于图3以30、60、90日为控制时段的太湖流域设计暴雨过程,拟定了3种不同暴雨中心分布的设计暴雨场景,用以分析中心位于不同区域设计暴雨的空间分布对太湖洪水位的影响:

场景2-1:各水利分区设计雨量按多年平均雨量为权重分配。

场景2-2:太湖上游区域雨量与流域设计雨量同频率,下游区域取相应雨量,上游区域或下游区域内各

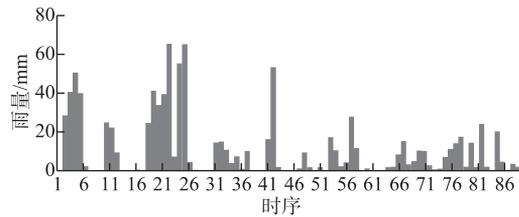


图3 以30、60、90日为控制时段的太湖流域设计暴雨过程

Fig.3 Design rainstorm process with 30 d, 60 d and 90 d control durations of Taihu Basin

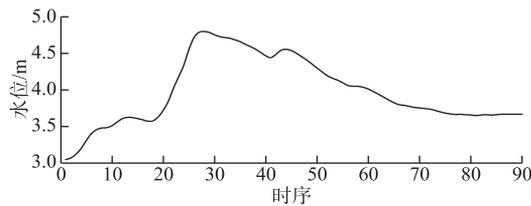


图4 对应于30、60、90日为控制时段的设计暴雨的太湖水位过程

Fig.4 Lake Taihu flood hydrograph based design storm with 30 d, 60 d and 90 d control durations

水利分区按多年平均雨量为权重分配雨量.

场景 2-3:太湖下游区域雨量与流域设计雨量同频率,上游区域取相应雨量,上游区域或下游区域内各水利分区按多年平均雨量为权重分配雨量.

表4列出了对应于以上3个考虑空间分布设计暴雨场景的流域水利分区最大90日设计雨量.

表4 设计条件下水利分区90日雨量统计

Tab.4 Hydraulic region rainfall during 90 d based design storm schemes

| 场景     | 设计雨量/mm |       |        |       |       |       |       | 流域    |
|--------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 湖西区     | 太湖区   | 浙西区    | 武澄锡虞区 | 阳澄淀泖区 | 杭嘉湖区  | 浦东浦西区 |       |
| 场景 2-1 | 981.9   | 950.8 | 1147.9 | 922.0 | 913.0 | 946.1 | 908.0 | 975.1 |
| 场景 2-2 | 990.2   | 960.1 | 1159.1 | 914.1 | 905.3 | 938.2 | 900.3 | 975.1 |
| 场景 2-3 | 947.5   | 918.5 | 1108.9 | 951.1 | 941.9 | 976.1 | 936.8 | 975.1 |

从表4可以看出,场景2-1考虑了流域各分区多年降雨均值,使得流域上游区域雨量相对于下游区域比重增加.上游区域雨量与流域设计雨量同频率的场景2-2在上游3个区的设计雨量均高于其它场景.下游区域雨量与流域设计雨量同频率的场景2-3在下游3个区的设计雨量均高于其它场景.

针对3个暴雨空间分布场景的设计暴雨过程,采用太湖流域水文水动力模型推求太湖洪水水位过程,太湖最高水位结果见表5.

根据表5所列3个场景对太湖最高洪水水位模拟结果,设计暴雨中心位于流域上游区域的场景2-2模拟出的太湖洪水水位最高,与暴雨中心位于下游的场景2-3相比,高出4.1 cm,说明太湖上游区域降水对太湖洪水水位影响更为明显.按各水利分区以多年平均雨量为权重分配的场景2-1模拟的太湖最高洪水水位较场景2-2低2.5 cm,但较场景2-3高1.6 cm.

太湖洪水水位对上游区域暴雨更为敏感主要是上游

表5 不同设计暴雨空间分布对太湖洪水水位影响  
Tab.5 Influence of spatio distribution of design storm on flood level of Lake Taihu

| 场景     | 太湖最高水位/m | 峰现日期 | 峰现时序 |
|--------|----------|------|------|
| 场景 2-1 | 4.801    | 7月4日 | 第27日 |
| 场景 2-2 | 4.826    | 7月4日 | 第27日 |
| 场景 2-3 | 4.785    | 7月4日 | 第27日 |

山丘区坡陡流急,汇水速度快,调蓄能力较小,加之太湖湖面的直接降雨径流,造成太湖水位迅速上涨.下游平原河网洪水对太湖水位顶托作用较上游区域直接汇入的作用相对较小,也使得下游区域暴雨径流对太湖洪水水位影响程度降低.

从太湖设计洪水水位安全角度考虑,采用暴雨中心位于流域上游区域的场景 2-2 比较可靠,如果需兼顾流域其它区域河网设计洪水水位,可以采用各水利分区按多年平均雨量为权重分配的场景 2-1. 如果关心太湖下游平原河网区洪水水位,可以采用设计暴雨中心位于流域下游区域的场景 2-3.

太湖最高洪水水位模拟值出现在 7 月 4 日,即设计暴雨过程的第 27 日,基本在最大 30 日雨量核心暴雨结束后 1 日就达到峰值,说明流域现状产汇流反应速度很快. 每一场景的对应的太湖洪水水位峰现时间相同,说明对于同一时空分布的暴雨典型,设计暴雨的空间分布对太湖最高洪水水位的发生时间没有明显影响.

### 2.3 暴雨时程分配对太湖最高水位的影响分析

1950 年迄今造成太湖最高水位的典型暴雨中,1954 年最大 90 日雨量较大,降雨时程分配比较均匀,但 30 日雨量重现期仅 5~6 年,不太符合现状条件流域防洪雨型;1991 年汛期主雨区在湖西区和武澄锡虞区,30 日最大雨量由两段梅雨的降雨组成,两段主雨期之间约有 10 日未降雨,雨型不常见,使得以此为典型设计暴雨计算出的太湖设计洪水水位偏低. 1954 年和 1991 年作为流域暴雨典型年均不太合适.

1999 年是太湖流域有记录以来最大的梅雨,暴雨中心位于流域南部区域,造成的太湖洪水水位处于历史最高,一直是太湖流域防洪规划和一些区域防洪规划中最核心的雨型.

2016 年梅雨期的暴雨中心位于太湖上游的湖西区,上游区降水整体大于下游区. 流域最大 30 日雨量频率接近 20 年一遇,60,90 日雨量频率约为 30 年一遇. 最大 30 日主雨峰雨量集中且位于最大 90 日雨量过程后部,属于对太湖流域防洪安全很不利的暴雨时程分配,见图 5,本次暴雨造成太湖 4.87 m 的最高洪水水位,仅次于 1999 年太湖最高水位.

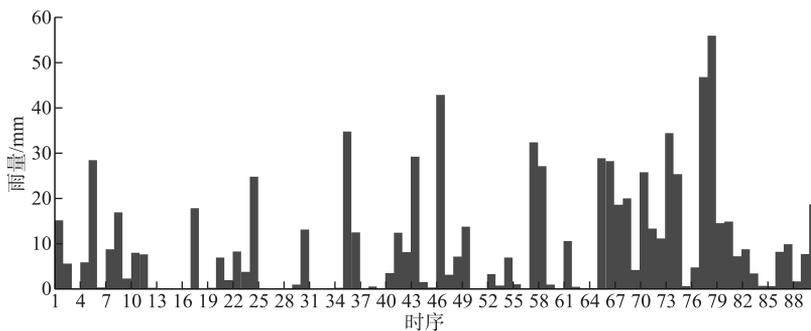


图 5 2016 年最大 90 日暴雨过程

Fig.5 Maximum 90 d rainfall process in 2016

2020 年梅雨期的降雨中心位于武澄锡虞区和太湖上游的浙西区,降水在流域上分布相对均衡,最大 30、60 日雨量均超过 2016 年. 最大 30 日主雨峰位于最大 90 日雨量过程中后部,也属于对太湖流域防洪安全不利的暴雨时程分配,7 月 21 日太湖最高水位 4.79m,属于太湖流域第三最高水位,与 1991 年太湖最高水位齐平(图 6).

根据以上分析,选择 1999、2016 和 2020 年梅雨期最大 90 日暴雨过程作为典型暴雨,分析降雨时程分配对太湖洪水水位的影响.

场景 3-1:采用 1999 年最大 90 日典型暴雨过程,设计暴雨计算的控制时段为 30、60、90 日,采用同频率缩放法由典型暴雨推求流域设计暴雨过程,各水利分区按多年平均雨量为权重分配雨量.

场景 3-2:采用 2016 年最大 90 日典型暴雨过程,设计暴雨计算的控制时段为 30、60、90 日,其它推求方法同场景 3-1.

场景 3-3:采用 2020 年最大 90 日典型暴雨过程,设计暴雨计算的控制时段为 30、60、90 日,其它推求方法同场景 3-1.

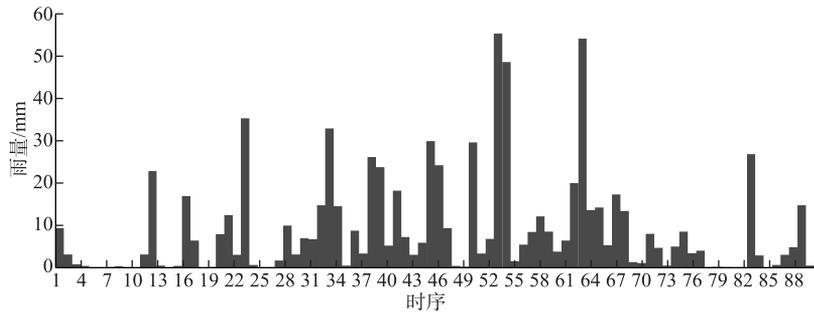


图 6 2020 年最大 90 日暴雨过程

Fig.6 Maximum 90 d rainfall process in 2020

为了更为直观认识不同典型暴雨过程得出的设计暴雨时程分配特征,绘制了 30、60、90 日设计暴雨时程分配概化图,明显可见场景 3-1 暴雨雨峰位于设计暴雨过程最前期,场景 3-2 暴雨雨峰位于后期,场景 3-3 暴雨雨峰位于中后期(图 7)。

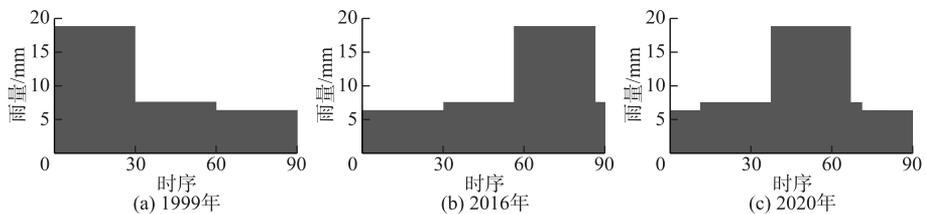


图 7 设计暴雨时程分配概化

Fig.7 Generalization chart of the three design rainstorm processes

针对 3 个场景的设计暴雨过程,采用太湖流域河网水文水动力模型推求太湖洪水水位过程见图 8,相应的太湖最高水位及出现时间与时序见表 6。

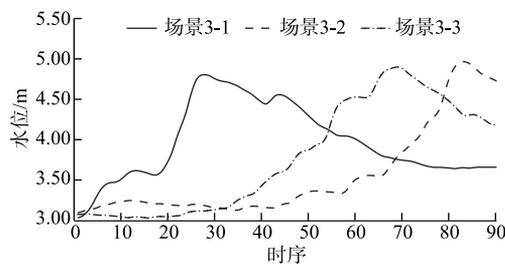


图 8 不同设计暴雨场景太湖洪水水位过程对比

Fig.8 Lake Taihu flood level hydrograph based different design storm schemes

图 8 和表 6 所列 3 个场景对太湖最高洪水水位模拟结果表明,设计暴雨的时程分配对太湖最高洪水水位影响明显。在同等条件下,30 日核心暴雨出现时间越是偏后的设计暴雨场景,模拟出的太湖洪水水位最高。在 3 个场景中,雨峰位于设计暴雨后期的场景 3-2 对应的太湖最高水位较雨峰位于设计暴雨前期场景 3-1 高出 16 cm,也较雨峰位于设计暴雨中后期场景 3-3 高 6.5 cm。同样,场景 3-3 对应的太湖最高水位也比场景 3-1 高出 9.5 cm。与之对比,1999 年实测太湖最高水位为 4.97 m,相当于本次研究中场景 3-2 的 100 年一遇暴雨推求得太湖最高水位,但因为 1999 年实况很多区域积水成涝,根据太湖流域管理局有关部门分析计算,按流域现状土地利用和工程条件计算,太湖最高洪水水位远高于 1999 年实测值。

表6 设计暴雨时程分配对太湖洪水位影响  
Tab.6 Influence of rain peak position of design storm on flood level of Lake Taihu

| 场景     | 太湖最高水位/m | 峰现日期  | 峰现时序 |
|--------|----------|-------|------|
| 场景 3-1 | 4.801    | 7月4日  | 第27日 |
| 场景 3-2 | 4.961    | 7月7日  | 第83日 |
| 场景 3-3 | 4.896    | 7月21日 | 第69日 |

主雨峰前期雨量影响初始水位. 依据太湖流域防洪规划采用的1999年典型暴雨,最大30日暴雨时间位于设计暴雨过程初始阶段(图7),从对应的太湖水位过程(图8)可见,30日主雨峰后的60日降雨对太湖最高水位没有贡献,只是影响太湖的退水过程,使得推求出的太湖最高水位相对雨峰偏后的场景偏低. 根据《水利水电工程设计洪水计算规范》(SL44-2006),以及有关水文专业文献对流域设计暴雨计算的论述<sup>[35-36]</sup>,以1999年作为典型暴雨不太符合设计暴雨计算关于雨峰偏后的安全原则.

根据以上分析,在太湖流域规划、设计、管理及研究工作中,增加2016年和2020年的暴雨典型,并结合流域综合需求作进一步研究,对于更为合理推求太湖流域设计暴雨,进而通过模拟计算推求太湖设计洪水位,保障全流域的防洪安全是非常必要的.

### 3 结论

1) 根据不同控制时段的组合采用同频率缩放方法推求设计暴雨场景,通过太湖流域水文水动力数学模型模拟了对太湖洪水位过程的影响,结果表明7日、15日控制时段暴雨对太湖最高洪水位及出现时间基本没有影响,太湖设计暴雨采用30、60、90日作为控制时段是合适的. 如果要综合考虑区域河网设计水位,增加7、15日控制时段也是可行的,但需要专题深入研究.

2) 对设计暴雨中心位于流域不同区域对太湖最高水位的影响模拟结果表明,在相同暴雨频率条件下,降水中心位于上游的暴雨过程造成的太湖洪水位明显高于其它空间分布的设计暴雨,在100年一遇设计暴雨条件下,最大差值为4.1 cm,说明太湖洪水位对上游区域的暴雨响应较为敏捷.

3) 对1999、2016、2020年典型推求的设计暴雨分析表明,设计暴雨时程分配对太湖洪水位影响非常显著. 在同等条件下,核心雨量位于设计暴雨后期则会造成更高的太湖洪水位,在100年一遇设计暴雨条件下,不同时程分配的设计暴雨推求出的太湖最高洪水位相差16 cm. 因此,建议考虑2016、2020年梅雨期降雨作为太湖设计暴雨分析计算的备选典型,并作进一步综合分析论证.

4) 太湖流域防洪规划中太湖设计洪水位的重现期不明,影响太湖大堤安全,根据本文设计暴雨方法,通过进一步分析论证,可以更为合理推求出指定频率太湖设计水位,为相关防洪工程规划、设计和管理提供合理依据.

### 4 参考文献

- [1] Lin ZX. Construction of flood control engineering and countermeasures for flood disaster mitigation in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2002, **14**(1): 12-18. DOI: 10.18307/2002.0102. [林泽新. 太湖流域防洪工程建设及减灾对策. 湖泊科学, 2002, **14**(1): 12-18.]
- [2] Wang YF, Xu YP, Zhang QY *et al.* Influence of stream structure change on regulation capacity of river networks in Taihu Lake Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(3): 449-458. DOI: 10.11821/dlxb201603008. [王跃峰, 许有鹏, 张倩玉等. 太湖平原区河网结构变化对调蓄能力的影响. 地理学报, 2016, **71**(3): 449-458.]
- [3] Zhang HH. Role of Taihu Lake in flood control efforts of Taihu Basin. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2010, **38**(6): 22-26. [章杭惠. 浅论太湖在太湖流域防洪中的作用. 浙江水利科技, 2010, **38**(6): 22-26.]
- [4] Wei YY, Li YP, Weng SL *et al.* Impact of urbanization on stream structure and connectivity of plain river network in the Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 553-563. DOI: 10.18307/2020.0223. [魏莹莹, 李一平, 翁晟琳等. 太湖流域城市化对平原河网水系结构与连通性影响. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 553-563.]

- [ 5 ] Wang LY, Xu YP, Yu MJ. Analysis of the urbanization effect on the Taihu plain river network—a case study of Wuchengxiyu region of Taihu Basin. *Resources and Environment in the Yangtza Basin*, 2012, **21**(2): 151-156. [王柳艳, 许有鹏, 余铭婧. 城镇化对太湖平原河网的影响——以太湖流域武澄锡虞区为例. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(2): 151-156.]
- [ 6 ] Hu Y, Lin HJ, Liu M. Revision of design storm for Taihu Basin. *Journal of China Hydrology*, 2016, **36**(5): 50-53. [胡艳, 林荷娟, 刘敏. 太湖流域设计暴雨修订. 水文, 2016, **36**(5): 50-53.]
- [ 7 ] Lin HJ, Liu M. Analytical review of hydrological design for Taihu Basin. *Journal of China Hydrology*, 2019, **39**(4): 84-89. [林荷娟, 刘敏. 太湖流域水文设计成果修订研究. 水文, 2019, **39**(4): 84-89.]
- [ 8 ] Hu S, Dai XB, Liu J *et al.* Calculation of temporal and spatial distribution of design storm in Taihu Basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, **27**(5): 70-74. [胡莎, 戴贤波, 刘俊等. 太湖流域设计暴雨的时空分布计算. 水资源与水工程学报, 2016, **27**(5): 70-74.]
- [ 9 ] Wu HY, Lu ZH. Review and thinking of water management practice in Taihu Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(3): 277-290. [吴浩云, 陆志华. 太湖流域治水实践回顾与思考. 水利学报, 2021, **52**(3): 277-290.]
- [ 10 ] Wu YN, Huang YM, Zhang YY *et al.* Construction and achievements of flood control, drought relief and disaster reduction systems in the Taihu Basin. *China Flood & Drought Management*, 2019, **29**(10): 89-98. [伍永年, 黄均盟, 张祎旻等. 太湖流域防汛抗旱减灾体系建设与成就. 中国防汛抗旱, 2019, **29**(10): 89-98.]
- [ 11 ] Zhu W, Zhang HH, Gan YY *et al.* Practices of flood regulation in the Taihu Lake in 2020 and considerations. *China Water Resources*, 2021, (15): 46-48, 39. [朱威, 章杭惠, 甘月云等. 2020年太湖洪水调度实践与思考. 中国水利, 2021, (15): 46-48, 39.]
- [ 12 ] Zhang HH, Liu SG, Ji TD. Analysis on the relationship between rainfall of Taihu Basin and water level of Taihu Lake. *Journal of China Hydrology*, 2021, **41**(1): 85-89. [章杭惠, 刘曙光, 季同德. 太湖流域降雨与太湖水位关系分析. 水文, 2021, **41**(1): 85-89.]
- [ 13 ] Li Y, Li HP. Hydrologic effects of land use change and its risk evaluation in Taihu Basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, **27**(5): 37-40. [李燕, 李恒鹏. 太湖流域土地利用变化的水文效应及其风险评价. 水土保持通报, 2007, **27**(5): 37-40.]
- [ 14 ] Li LJ, Hu QF, Wang YT *et al.* Spatiotemporal pattern of water yield changes over the Taihu Basin during the rapid urbanization process. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1289-1298. DOI: 10.18307/2019.0519. [李伶杰, 胡庆芳, 王银堂等. 快速城镇化进程中太湖流域产水量变化的时空分布特征. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1289-1298.]
- [ 15 ] Ji HP, Wu HY, Wu J. Variation of inflow and outflow of lake Taihu in 1986–2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.18307/2019.0612. [季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986—2017年太湖出、入湖水量变化分析. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1525-1533.]
- [ 16 ] Mao R. Comparison of three heavy floods since 1949 in Taihu Lake Basin and some suggestions on flood control in future. *J Lake Sci*, 2000, **12**(1): 12-18. DOI: 10.18307/2000.0103. [毛锐. 建国以来太湖流域三次大洪水的比较及对今后治理洪涝的意见. 湖泊科学, 2000, **12**(1): 12-18.]
- [ 17 ] Wu HY, Wang YT, Hu QF *et al.* Tempo-spatial change of precipitation in Taihu Lake Basin during recent 61 years. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(2): 75-81. [吴浩云, 王银堂, 胡庆芳等. 太湖流域61年来降水时空演变规律分析. 水文, 2013, **33**(2): 75-81.]
- [ 18 ] Yu G, Guo Y, Liao MN. Probe on attributions of extreme floods responding to the climate changes in Lake Taihu catchment. *J Lake Sci*, 2013, **25**(5): 765-774. [于革, 郭娅, 廖梦娜. 气候变暖下太湖极端洪水的归因探讨. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 765-774.]
- [ 19 ] Luo Y, Dong ZC, Guan XK *et al.* Flood risk analysis in the Taihu Basin during flood periods based on Copula function. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 223-235. DOI: 10.18307/2020.0121. [罗贇, 董增川, 管西柯等. 基于Copula函数的太湖流域汛期洪涝灾害危险性分析. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 223-235.]
- [ 20 ] Yin YX, Xu YP, Chen Y. Maximum water level of Taihu Lake and its relation to the climate change and human activities. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(7): 609-614. [尹义星, 许有鹏, 陈莹. 太湖最高水位及其与气候变化、人类活动的关系. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(7): 609-614.]
- [ 21 ] Wang LZ, Hu QF, Wang YT *et al.* Comparison of the two flood events occurred in 2016 and 1991 in the Taihu Lake Basin. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2018, **46**(6): 471-478. [王磊之, 胡庆芳, 王银堂等. 太湖流域2016

- 年、1991年大洪水对比分析. 河海大学学报: 自然科学版, 2018, 46(6): 471-478.]
- [22] Liu T, Ye T, Shen H. Analysis and thinking on the flood in Taihu Lake Basin in 2020. *Water Resources Development and Management*, 2021, 19(7): 80-84. [刘涛, 叶婷, 沈浩. 对2020年太湖流域性洪水的分析与思考. 水资源开发与管理, 2021, 19(7): 80-84.]
- [23] Wu J, Liang P, Lin HJ *et al.* Meiyu determination and causes of typical abnormal Meiyu years in Taihu Basin?. *J Lake Sci*, 2021, 33(1): 255-265. DOI: 10.18307/2021.0118. [吴娟, 梁萍, 林荷娟等. 太湖流域梅雨的划分及其典型年异常成因分析. 湖泊科学, 2021, 33(1): 255-265.]
- [24] Wu HY. Comparison and analysis of plum rains flood risk in Taihu Basin. *Hydrology*, 2000, 20(4): 54-57. [吴浩云. 太湖流域典型年梅雨洪涝灾害比较分析. 水文, 2000, 20(4): 54-57.]
- [25] Liu Y, Wang YT, Chen YF *et al.* Spatial-temporal evolution characteristics of plum rains in Taihu Lake Basin. *Hydrology*, 2011, 31(3): 36-43. [刘勇, 王银堂, 陈元芳等. 太湖流域梅雨时空演变规律研究. 水文, 2011, 31(3): 36-43.]
- [26] Wang TS ed. Flood control and water resources management in Taihu Basin. Beijing: China Water Power Press, 2006. [王同生. 太湖流域防洪与水资源管理. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.]
- [27] Cheng WH, Wang CH, Zhu Y eds. Taihu basin model. Nanjing: Hohai University Press, 2006. [程文辉, 王船海, 朱琰. 太湖流域模型. 南京: 河海大学出版社, 2006.]
- [28] Lin HJ, Yang HL. Improvement of Taihu Basin hydrodynamic model. *Journal of Hydrodynamics*, 1999, 14(3): 312-316. [林荷娟, 杨洪林. 太湖流域河网水动力学模型的改进. 水动力学研究与进展: A辑, 1999, 14(3): 312-316.]
- [29] Xu TY, Liu KQ, Li C *et al.* Establishment and application of large-scale flood inundation simulation model for Taihu Basin. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(4): 40-45. [徐天奕, 刘克强, 李琛等. 太湖流域大尺度洪涝淹没仿真模型的建立及应用. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 40-45.]
- [30] Yu XG, Wu TL, Jiang JH *et al.* 1999 heavy flooding in the Taihu Basin: Investigation, analysis and further suggestions on the integrated harnessing in the basin. *J Lake Sci*, 2000, 12(1): 1-5. DOI: 10.18307/2000.0101. [虞孝感, 吴泰来, 姜加虎等. 关于1999年太湖流域洪水灾情、成因及流域整治的若干认识和建议. 湖泊科学, 2000, 12(1): 1-5.]
- [31] Wu TL. 1999 catastrophic flood in Taihu Basin and the consideration for Taihu flood control planning. *J Lake Sci*, 2000, 12(1): 6-11. DOI: 10.18307/2000.0102. [吴泰来. 太湖流域1999年特大洪水和对防洪规划的思考. 湖泊科学, 2000, 12(1): 6-11.]
- [32] Ou YL, Wu HY eds. 1999 flood in Taihu Basin. Beijing: China Water & Power Press, 2001: 4-5. [欧炎伦, 吴浩云. 1999年太湖流域洪水. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 4-5.]
- [33] Hu ZC, Liu SG, Zhong GH *et al.* Flood response to temporal variation of precipitation in plain river network region in Taihu Lake drainage basin. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(11): 46-51, 56. DOI: 10.11988/ckyyb.20170570. [胡子琛, 刘曙光, 钟桂辉等. 太湖流域平原河网降雨时程分布变化的洪水响应. 长江科学院院报, 2018, 35(11): 46-51, 56.]
- [34] Cai M, Li C, Li YT *et al.* Discussion on the water movement law in the upper Taihu Lake network. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, (12): 127-133. [蔡梅, 李琛, 李勇涛等. 江河湖连通的太湖上游河网水流运动规律探索. 中国农村水利水电, 2020, (12): 127-133.]
- [35] Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects; SL44-2006. Beijing: China Water & Power Press, 2006. [水利水电工程设计洪水计算规范; SL44-2006. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.]
- [36] Liang ZM, Zhong PG, Hua JP eds. Hydrology and hydrographic computation. Beijing: China Water Power Press, 2006. [梁忠民, 钟平安, 华家鹏. 水文水利计算. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.]