

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.05.015

# 基于城市内涝数值模拟的设计暴雨雨型研究

唐明<sup>1</sup>, 许文斌<sup>2,3</sup>, 尧俊辉<sup>4</sup>, 唐传师<sup>5</sup>

(1. 南昌工程学院 水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 南昌市城市内涝防治与河湖水质调控工程技术研究中心, 江西 南昌 330038; 3. 南昌市城市规划设计研究总院, 江西 南昌 330038; 4. 南昌市水文局, 江西 南昌 330018; 5. 南昌市气象局, 江西 南昌 330008)

**摘要:** 以南昌市青山湖排涝片区为研究对象,从典型暴雨的选择入手,结合现行规范要求,分析了不同典型暴雨的放大方法以及水利部门“综合雨型”的优缺点,应用 MIKE 软件模拟不同设计暴雨雨型对城市排涝过程的影响。通过对泵站开机负荷、主要控制断面的水位和流量等情况的对比分析,提出城市内涝防治体系设计暴雨雨型计算方法的选择建议。研究结果表明,同倍比放大法虽然便于应用,但其主要统计时段降雨量的重现期差异很大,难以客观评价市政排水与流域排涝系统的能力;同频率放大法能够控制主要时段的“同频”,但其时间刻度需要细化,调算过程较为复杂,而且不同典型暴雨同频放大条件下的排涝过程差异较大;“复合雨型”可以兼顾城市排水与流域排涝系统的能力复核,雨型生成过程相对简单,便于应用。

**关键词:** 城市内涝防治; 设计暴雨雨型; 数值模拟

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)05-0097-09

## Design Rainstorm Patterns Based on Numerical Simulation of Urban Flooding

TANG Ming<sup>1</sup>, XU Wen-bin<sup>2,3</sup>, YAO Jun-hui<sup>4</sup>, TANG Chuan-shi<sup>5</sup>

(1. College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Nanchang Urban Flooding Prevention and Water Quality Control Engineering Technology Research Center, Nanchang 330038, China; 3. Nanchang Urban Planning and Design Research Institute, Nanchang 330038, China; 4. Nanchang Hydrology Bureau, Nanchang 330018, China; 5. Nanchang Meteorological Bureau, Nanchang 330008, China)

**Abstract:** Taking Qingshan Lake drainage area of Nanchang City as the research object, starting from the selection of typical rainstorm, combined with the requirement of the current code, the advantages and disadvantages of different amplification methods of typical rainstorm and “comprehensive rainstorm pattern” proposed by water conservancy bureau were analyzed, and MIKE software was applied to simulate the influence of different design rainstorm patterns on urban drainage process. Based on comparative analysis of pump station load, water level and flow hydrograph of the main control sections, suggestions on the selection of design rainstorm pattern calculation method for urban flooding control system were proposed. Although the same ratio amplification method was convenient for application, it was difficult to evaluate the capacity of municipal drainage and regional drainage system objectively. The

reason was that the return period of the rainfall in the main statistical period varied greatly. The same-frequency amplification method could control the same frequency of the main periods, but its timescale needed to be refined and the adjustment process was complex. Moreover, the drainage process of different typical storms amplified with the same frequency was quite different. The “composite rainstorm pattern” took into account the ability check of municipal drainage and regional drainage system, and the generation process of rainstorm pattern was relatively simple, which was convenient for application.

**Key words:** prevention and control of urban flooding; design rainstorm pattern; numerical simulation

近百年来,以平均气温升高与降雨变化为主要特征的气候变化和以城市化发展为主要标志的高强度人类活动对地球系统产生了深远的影响,全球气候变暖和人类活动直接影响了水循环要素的时空分布特征,增加了极端水文事件发生的概率,城市热岛效应、阻碍效应和凝结核效应等,使得城市暴雨洪涝问题日益增多<sup>[1]</sup>。特别是新世纪以来,城市内涝问题已经成为热点话题,全国各地都在开展城市内涝防治体系的核查与建设<sup>[2]</sup>,设法提高城市内涝应对能力。

城市内涝防治体系包含源头减排、市政管网和流域排涝等工程性设施,行业管理分别隶属于市政、水利两个系统。但是两者在设计雨型选择上差异较大,前者大多采用降雨历时低于3 h的设计雨型,而后者基本采用降雨历时为24 h的设计雨型;而且两个系统在暴雨频率计算样本选择和计算方法上均有差异<sup>[3]</sup>。此外,随着城市内涝数值模型的开发、应用与推广,对设计暴雨雨型的时间刻度提出了更高的要求,常常需要细化到分钟。所以,当需要设计或复核城市内涝防治体系时,既要考虑流域排涝,又要兼顾市政管网与局地减排设施的设计标准,使得设计暴雨雨型的选择成为实践中的一个焦点和难点。

近些年来,有关设计暴雨雨型的研究成为行业热点,呈现两个特点:一是按照暴雨强度公式推求短历时暴雨雨型<sup>[4-6]</sup>的研究较多,而有关雨洪模拟所需要的长历时设计暴雨雨型的研究较少;二是在长历时设计暴雨雨型的选取上,尽管也推荐典型暴雨同频率放大方法<sup>[7-9]</sup>,但是对同频率放大的计算过程介绍得不够,也未说明各自的优缺点,不利于相关方法的选择。

## 1 研究主题分析

### 1.1 南昌市典型暴雨分析

南昌市暴雨天气主要在4月—8月,年均暴雨

天数为5.7 d。主汛期(5月—7月)是暴雨与大暴雨的多发期;而连续性暴雨出现最多的是6月中下旬,属于江淮梅雨锋暴雨<sup>[10]</sup>。江淮梅雨锋暴雨持续时间长,降雨强度大,容易形成致洪暴雨,造成严重的城市内涝等灾害<sup>[11]</sup>。影响南昌市的主要暴雨类型就是梅雨锋上 $\beta$ 中尺度的对流性暴雨,这类暴雨的局地性特征明显,瞬时强度大,易致灾<sup>[12]</sup>。主汛期之后,主要受强对流天气、台风或其外围影响形成强降雨;一般情况下,连续性特征不明显,但短时雨强大,最大1 h降雨可达99.7 mm,最大3 h降雨可达120.8 mm。

新世纪以来,南昌市经历了多次暴雨袭击,本研究根据“突发性强、暴雨强度大、危害严重”等特点,选择了3场典型降雨。

2012年5月12日—13日,受中低层低涡、切变线和低空急流影响,南昌市普降大暴雨,城区处于100~200 mm降雨覆盖区。“5·12”暴雨降雨集中,6 h雨强大,城区受涝严重。

2012年8月21日—22日,南昌市出现了一次强对流性的大暴雨天气,暴雨中心位于主城区,湖坊站过程降雨达175 mm。“8·21”暴雨主要集中在3 h以内,虽然时程短,但突发性强,给城市排水系统造成巨大压力,城区短时积水严重。

2019年7月12日—13日,受低槽东移、西南急流和低层锋区影响,南昌市出现一次明显的梅雨锋大暴雨过程,主城区雨量集中,东湖区面雨量达到171.0 mm。“7·12”暴雨时程较长,符合影响南昌市最主要暴雨类型的基本特点。

### 1.2 城市暴雨的设计雨型分析

依据《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017)、《水利水电工程设计洪水计算规范》(SL 44—2006),不论是采用“典型暴雨”同倍比放大法或同频率放大法,还是采取“综合雨型”同频率放大

法,都是规范、可行的计算方法。

1.2.1 “综合雨型”同频率放大法

“综合雨型”是水利部门根据实测暴雨资料,运用统计分析推求出来的。各省(区)水文手册中按地区气候特点综合概化出“雨型表”,通常情况下,将暴雨的核心部分放在较靠后的位置,从汇流的角度,可能形成更加不利的过程,更能考验水利设施的防范能力。

“综合雨型”中,不同历时的最大降雨量也不能达到同频的要求,主要是 1 h 雨量偏小,最大 3 h、6 h、12 h 的降雨量都偏大,需要进行同频调整。由于它是一种人工分配的结构化雨型,其同频调算过程并不太复杂。另外,“综合雨型”的最小统计时段为 1 h,需要对每个小时内的雨量进行再分配,才能达到城市内涝数值模型的时间刻度要求。

1.2.2 典型暴雨同倍比放大法

同倍比放大法最大的优点就是能够保证典型降雨时程的基本形态不变;而且该方法计算过程比较简单,只需要考虑设计历时的降雨总量缩放倍数,即可以形成某一频率的设计暴雨雨型,并且在时间刻度上与原始暴雨资料保持一致。随着气象监测技术的发展,降雨记录的时间刻度已经细化到分钟,因此,采用同倍比放大法,容易达到雨洪模拟软件要求的精度。

其缺点是只能满足某一个设计历时下的同频要求,而其他统计时段特征降雨量的重现期差异较大。按照 24 h、20 年一遇暴雨量对 3 个典型雨型进行同倍比放大后,采用市政标准计算 1 h 及以下降雨历时的重现期,采用水利标准计算 2 h 及以上的重现期,结果见表 1。

表 1 不同典型雨型的特征值对照

Tab.1 Comparison of characteristic values of different typical rainfall patterns

项 目	“5·12”暴雨		“7·12”暴雨		“8·21”暴雨	
	雨量/mm	重现期/年	雨量/mm	重现期/年	雨量/mm	重现期/年
10 min	13.2	<0.5	19.1	<1	30.4	3
20 min	21.9	<0.5	31.3	<2	53.8	20
30 min	27.6	<1	43.5	3	78.7	>100
1 h	48.9	<2	62.6	5	128.6	>100
2 h	86.4	14	99.2	37	176.1	>100
3 h	120.3	41	114.8	31	209.6	>100
6 h	202.9	>100	143.6	30	223.6	>100
12 h	216.1	78	199.2	43	223.6	97
24 h	223.6	20	223.6	20	223.6	20

从表 1 可以发现:短历时的重现期总体偏小,不利于源头减排、排水管渠等工程设施的规模确定和能力复核;较长历时的特征值普遍偏大,有些数值甚至超过 100 年一遇,超出了排涝体系的真实能力,不能客观评价流域排涝工程能力。不同历时降雨量重现期差异过大,难以兼顾流域排涝、市政管网与局地

减排设施的设计标准。

1.2.3 典型暴雨同频率放大法

选定典型暴雨后,就可以用设计频率下的不同历时特征降雨量(本研究采用水文部门按年最大值样本推求的雨量成果)控制不同时段 的放大系数(见表 2),对典型暴雨进行分段缩放。

表 2 不同典型暴雨的同频率放大系数对照

Tab.2 Amplification factors of different typical rainstorms

项 目	最大 1 h	最大 3 h 的 其余 2 h	最大 6 h 的其余 3 h	最大 12 h 的 其余 6 h	最大 24 h 的 其余 12 h
“5·12”暴雨	1.946	0.628	0.410	3.408	7.567
“8·21”暴雨	0.920	0.802	1.441	—	—
“7·12”暴雨	2.663	0.912	1.653	1.278	3.243
注:“8·21”降雨特征为 6 h 之后无降雨,因此 6 h 之后不能按同频系数来放大,应另行调算。					

同频率放大法的最大优点就是控制时段的降雨量都同时达到设计频率,体现理论上的一致性;当

然,它并不是任意时段上的“同频”。另外,即使是“8·21”暴雨这样典型的短历时强降雨,实际降雨



期只有6 h,按照同频放大以后,也可以调整为24 h雨型。

但是,采用同频率放大法时,由于各控制时段的缩放系数各异,控制时段边缘的数据的变动可能导致新的最大值出现;以表2为例,在完成第一轮系数调整后,“5·12”暴雨出现新的6 h、12 h最大值;而“8·21”与“7·12”暴雨均出现新的3 h、6 h最大值。因此,需要多次调整,才能达到控制时段的“同频”。同样,按典型暴雨进行同频率放大得出的雨型也要进行时间刻度的细化。

#### 1.2.4 同频率放大的设计雨型比较

图1列出了具有不同降雨特征的3场典型暴雨和“综合雨型”经过同频率放大(20年一遇)后的时程分布情况。

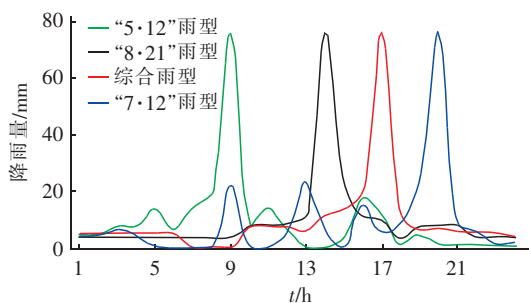


图1 同频率放大后的雨型对比

Fig. 1 Comparison of rainstorm pattern after same-frequency amplification

从图1可以看出,这4种雨型的共同点是都有一个明显的集中降雨期(6 h),并且1 h、3 h、6 h的降雨量均达到同频雨量,完全一致。不同点主要有两处:一是占据绝对优势的6 h“主峰”的时序上的差异;二是尽管4种雨型在12 h、24 h降雨量上一致,但6 h之外的降雨时程分布还存在差异。

由于自然降雨过程存在较大的随机性,不同的雨型经过同频率放大后,不论是“主峰”时序,还是“小峰”的个数(“7·12”暴雨有3个明显的“小峰”、“5·12”暴雨有2个明显的“小峰”、“8·21”暴雨没有明显的“小峰”),均有较大的差异。“综合雨型”是人工构造的“单峰”雨型,时序稳定;“单峰”之外的降雨分布亦相对均匀,同频调算之后也没有明显的“小峰”。

## 2 数值模拟及结果分析

### 2.1 模拟区域概况

青山湖排涝片区濒临赣江,地势平坦低洼,汇水

面积为52 km<sup>2</sup>,地面高程在19.0~23.0 m之间,设计排涝标准为20年一遇。该片区来水通过城市排水管网汇入玉带河,经青山湖调蓄后,由青山闸自排或青山湖电排站提排入赣江(见图2)。其中,青山湖电排站装机10台,总设计排涝流量为77.6 m<sup>3</sup>/s;青山湖总面积约3.01 km<sup>2</sup>,承担着主要调蓄区的功能,蓄涝容积为288×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,最低蓄涝水位为16.23 m,最高蓄涝水位为17.23 m。



图2 青山湖排涝片区总平面图

Fig. 2 General layout of Qingshan Lake drainage area

## 2.2 基于MIKE的耦合模型构建与率定

### 2.2.1 模型的构建

① 收集整理区域地下排水管网普查资料,通过MIKE URBAN内置的数据导入功能,导入普查数据,形成一维管网文件;普查资料不足的区域,进行管网补勘,通过MIKE URBAN内置的属性创建功能,人工补录;采用泰森多边形法进行汇水面积的自动划分,同时给定径流计算参数及计算法则(随形状变化的 $T-A$ 曲线法);最后,进行人工检查与系统自检,从而形成完善的一维管网模型。

② 根据实际水系的走向生成河网shp文件;根据实测资料定义不同里程的断面尺寸以及河底标高;根据工程设计参数以及不同的模拟工况确定边界数据及水力参数,进而完成河网模型的构建,具体如图3所示。



图3 河网模型

Fig.3 River network model

③ 基于实测地形文件,借助 ArcMap 生成网格大小为  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的 Dem 文件及 ASC II 数据文件,运用 Mike Zero,将 ASC II 转化为 dfs2 文件,输入模拟步长、文件输出路径、地表径流曼宁系数等参数,构建二维地表漫流模型。

④ 运行 MIKE FLOOD 耦合模型,通过管网模型内的人孔与二维地表漫流模型的网格点进行自动耦合、管网模型内的排水口与河网模型的水位点进行耦合、河网模型的两岸与二维地表漫流模型的网格进行耦合。

### 2.2.2 模型的率定

利用“7·12”暴雨的实测雨量、河湖水位、电排站外排放量以及排涝片区的积水点等资料对模型进行率定。利用青山湖排涝区3个雨量站的实测数据得到率定工况的降雨时间序列;将电排站实际抽排流量的监测数据导入 Mike Zero,形成流量时间序列;将实测的河道初始水位输入模型;运行耦合模型,得到青山湖水位过程与青山湖排涝区的积水情况(如图4所示)。模拟得到的积水点位与市排水部门的统计信息基本吻合(由于管网模型按照设计管径构建,没有考虑管道淤积因素,模拟得到的具体积水点处积水深度与实际情况有些差异);而且,当日实测青山湖最高水位  $16.83\text{ m}$  与模拟值  $16.85\text{ m}$  接近,由此可以认为构建的耦合模型的相关参数设定是合理的。

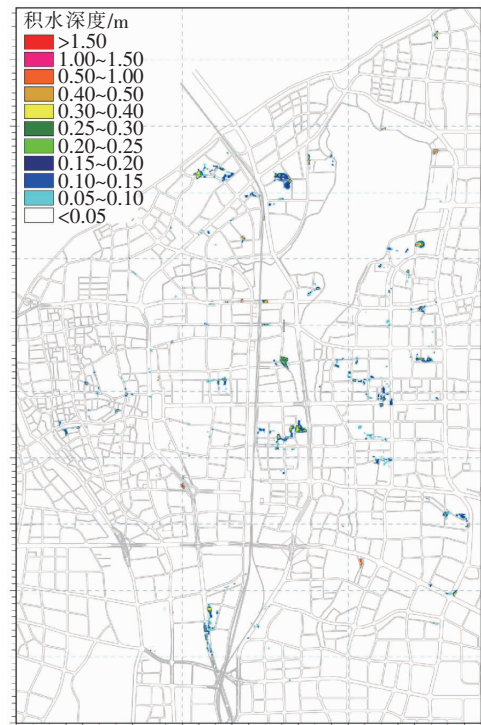


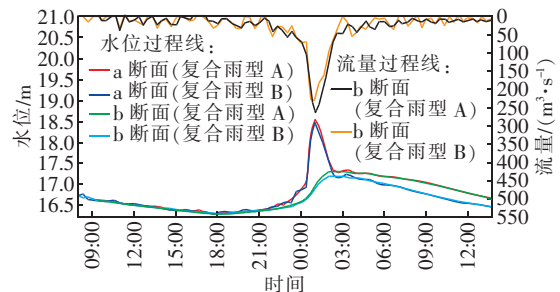
图4 “7·12”暴雨条件下的积水情况

Fig.4 Ponding distribution map under the condition of “7·12” rainstorm

## 2.3 数值模拟结果分析

### 2.3.1 采取不同雨量细化方法的“复合雨型”对比

以“综合雨型”为例,对同频率放大后的雨型进行小时内的雨量再分配。第1种方法,在“综合雨型”的基础上,用市政部门常用的芝加哥雨型细化最大1 h雨量,其余23 h按雨量大小在各个小时内进行均匀分配(“复合雨型A”);第2种方法,在“综合雨型”的基础上,用芝加哥雨型对每个1 h雨量进行细化(“复合雨型B”)。运用 MIKE 软件对两种雨型下的排涝过程进行模拟,选取3个控制断面(东、南、西三支汇流处断面a,青山湖进口处断面b,北支出口处断面c,具体位置见图3)的水位过程线进行分析,结果见图5。



a. 断面 a、b 的水位和流量过程线

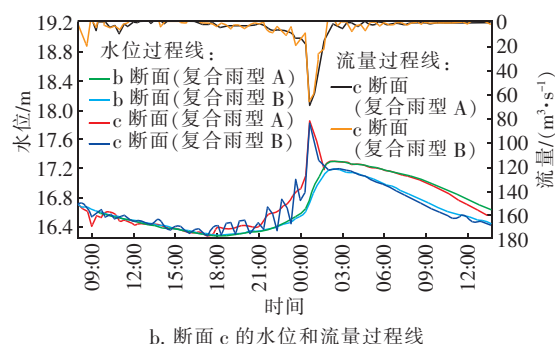


图5 复合雨型A、B条件下主要断面水位和流量过程线的比较

Fig. 5 Water level and discharge hydrograph of main sections under compound rainfall pattern A and B

图5(a)中显示的断面a在2种“复合雨型”条件下的水位过程线,在汇流峰值区及之前吻合度很高;断面b在汇流峰值之前的吻合度很高。但是,在过程线的后段,两种雨型的过程线逐渐分离,“复合雨型A”的水位过程线处在“复合雨型B”的水位过程线上方,这主要是因为“复合雨型A”最大2 h雨量较“复合雨型B”的更大(尽管其最大1 h与3 h雨量一样),以断面b为例,“复合雨型A”条件下,流量过程线在峰值区更高,需要调蓄的水量增加,从而导致水位壅高现象更加明显。

图5(b)中显示的断面c在2种“复合雨型”条件下的水位过程线在汇流峰值区吻合度很高。在汇流峰值出现之前,“复合雨型B”的水位过程线受降雨波动的影响明显,这是因为断面c所在的渠道不直接汇入青山湖(只是达到一定水位后溢流进入青山湖),在中低水位时,渠道自身调蓄能力较差,水位对流量波动较为敏感;相对于“复合雨型B”来说,在“复合雨型A”条件下,断面c的流量波动较小,从而导致其水位过程线的波动性也较小。

经比较发现,两种细化方式带来的控制断面的差异并不大,从能力复核的角度,“复合雨型A”所采用的细化方法更加有利。对于20年一遇的“复合雨型A”,其1 h、3 h、6 h、12 h、24 h降雨量均达到了水利的20年一遇标准;其1 h及以下历时降雨量,按照市政标准,重现期均为15年一遇,能够起到复核市政管网与局地减排设施的作用,因此该雨型可以兼顾城市排水与流域排涝两个系统。

### 2.3.2 不同典型暴雨同倍比放大的对比分析

根据之前有关典型暴雨的分析,选择“5·12”、

“7·12”两场暴雨按照24 h、20年一遇的降雨量进行同倍比放大,并对它们的模拟结果进行比较分析。两场暴雨在时序上的降雨量差异较大,前者降雨更为集中,后者相对均匀一些。运用MIKE软件对上述雨型下的排涝过程进行模拟,经比较后发现:

① 从降雨集中期出现的时间以及汇流峰值来看,2种典型暴雨经过同倍比放大后的差别较大。“5·12”暴雨集中降雨期更早、量更大,泵站满负荷开机时间长了约5 h。

② 从青山湖的调蓄水位来看,“5·12”暴雨下的水位很高,达到17.68 m,超过设计值0.45 m,主要原因是“5·12”暴雨经同倍比放大后,3 h及以上的降雨量大大超过了20年一遇,其中,6 h降雨量甚至超过了100年一遇,对城市排水系统的压力过大,不适合采用同倍比放大法推导设计雨型。

③ 图6显示,从断面a、c水位抬升的情况来看,两种雨型在对城市管网顶托作用的影响方面存在明显差异。“5·12”暴雨条件下的骨干水系水位抬升持续的时间更长,而“7·12”暴雨条件下则表现为峰值更高,但两者在集中暴雨期的水位均大大超过市政管网设计条件。“5·12”暴雨高水位持续时间长的原因是其3 h、6 h、12 h的降雨量均超过了“7·12”暴雨;“7·12”暴雨高水位峰值更高的原因是其1 h、2 h的降雨量均超过“5·12”暴雨。

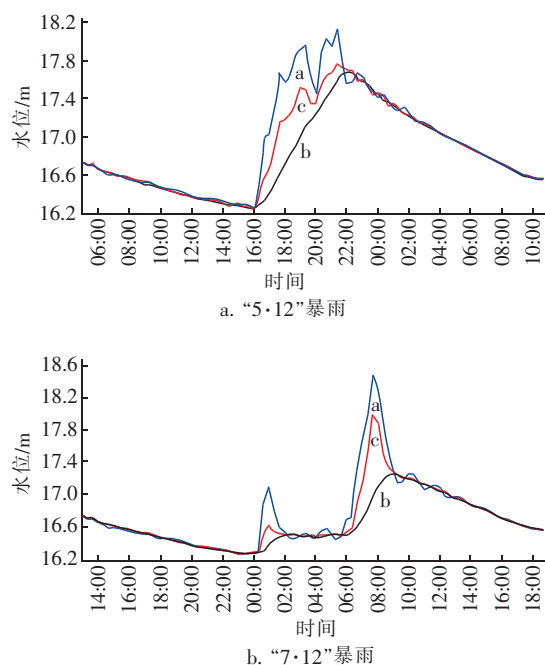


图6 主要断面的水位过程线

Fig. 6 Water level hydrographs of main sections



### 2.3.3 不同的同频率放大雨型对比分析

运用 MIKE 软件对经同频率放大后的“7·12”、“5·12”、“8·21”暴雨和“复合雨型 A”条件下的排涝过程进行模拟,同样选取断面 a、b、c 的水位过程线进行分析,结果见图 7。

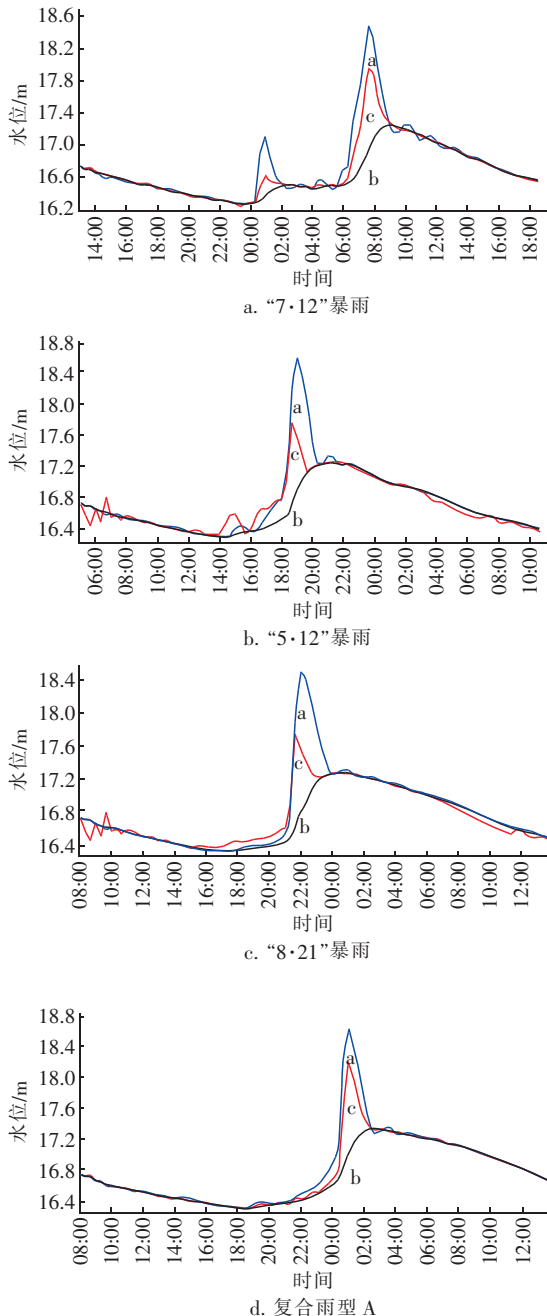


图7 不同雨型下主要断面的水位过程线

Fig.7 Water level hydrographs of main sections under different rainstorms

图7显示,经同频率放大后的不同设计雨型,在主要断面上的水位过程线形态相似。其排涝过程差

异体现在两个方面:一是汇流峰值时序的不同(但与降雨峰值的时序保持一致);二是24 h末主要断面水位的不同。其原因是降雨峰值越靠后,24 h之内,泵站满负荷运行时间就越少,当日的排涝总量就更少。

如图7(a)所示,经同频率放大后的“7·12”暴雨在最大6 h降雨时程之前,有3个明显的小峰,在排涝过程中,调蓄区可以多次发挥调蓄的作用,从而较大幅度地削减了调蓄区及骨干水系的水位(降幅达50 cm)。最能体现南昌暴雨特点的“7·12”暴雨,经同频率放大后,其调蓄区最高水位仅为16.83 m,大大低于设计值,难以体现校核的功能,并不适合采用同频率放大法。

不同雨型下青山湖的水位过程线如图8所示。可以看出,“复合雨型”与同频率放大后的“5·12”、“8·21”暴雨条件下的排涝过程表现出较好的一致性。主要是因为“复合雨型”与“8·21”暴雨在“单峰”外降雨相对均匀;而“5·12”暴雨虽然也有2个小峰,但只有1个位于最大6 h降雨时程之前,而且距离主峰很近,能够增加的调蓄量有限,对削减调蓄区水位的效果不明显。“复合雨型”对应的最高蓄涝水位略高些,从能力复核的角度,该雨型更为有利一些。

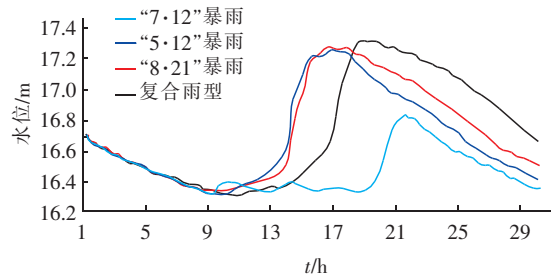


图8 不同雨型下青山湖水位过程线

Fig.8 Water level hydrograph of Qingshan Lake under different rainstorms

### 3 结论

“综合雨型”同频率放大法、“典型暴雨”同倍比或同频率放大法,都是规范允许的计算方法,但是,不同的方法有各自的优缺点。因此,在设计或复核城市内涝防治体系时,需要根据工作实际,进行合理化选择。

① 同倍比放大法能保证典型降雨的基本形态不变,且计算简单,便于时间刻度的细化。但是,它只能满足设计历时下的频率要求,而其他主要统计

历时降雨量的重现期差异很大,难以客观评价市政排水与流域排涝系统的能力;在实际应用中,很难找到主要统计历时降雨量重现期较为一致的雨型。当内涝防治体系设计或能力复核精度要求较高时,不建议采用。

② 同频率放大法能针对工程建设的设计或复核需要,控制主要时段的“同频”,体现理论上的一致性;同频率放大后的雨型都有一个明显的6 h集中降雨期,有利于排涝系统的能力复核。但是,其时间刻度需要细化,同时,受典型暴雨时程随机分布的影响,雨型调算过程较为复杂,排涝过程也存在较大差异。

③ 不同的典型暴雨适用不同的放大方法,在应用典型暴雨进行设计雨型计算时,需要结合当地气候特点,寻找多个典型暴雨,通过内涝数值模拟进行合理化选择。

④ “综合雨型”是各地水利行业根据实测暴雨资料,按地区气候特点综合概化的“雨型表”,更能考验水利设施的防范能力。尽管在24 h以下的时段雨量也不能保证“同频”,但是,由于“综合雨型”时程系数是一种结构化的人工分配,其同频调算过程相对简单,而且能够克服暴雨时程随机性带来的排涝过程差异。

⑤ “复合雨型”本质上是采取“长、短历时”对城市暴雨进行双向控制的构想,将芝加哥雨型等适应当地市政系统短历时排水特点的雨型嵌入到“综合雨型”的最大1 h当中,既能从较长历时降雨的角度考验排涝设施的能力,又能从短历时降雨的角度考验排水管网的能力,从而能够兼顾市政排水与流域排涝两个系统的能力复核,并且该雨型生成过程相对简单,便于应用。

#### 参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展,2014,25(4):594-605.  
ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. Hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4):594-605 (in Chinese).
- [2] 黄国如,罗海婉,陈文杰,等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展,2019,30(5):643-652.  
HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5):643-652 (in Chinese).
- [3] 谢华,黄介生. 城市化地区市政排水与区域排涝关系研究[J]. 灌溉排水学报,2007,26(5):10-13.  
XIE Hua, HUANG Jiesheng. Study on the relationship of municipal drainage and hydrological for urban area [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(5):10-13 (in Chinese).
- [4] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展,2017,28(6):820-828.  
HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6):820-828 (in Chinese).
- [5] 张鹭,李菁,裴海英,等. 南京市短历时暴雨雨型分析[J]. 气象科技进展,2019,9(3):15-20.  
ZHANG Lu, LI Jing, PEI Haiying, et al. Rainfall pattern analysis of short duration rainstorm in Nanjing [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2019, 9(3):15-20 (in Chinese).
- [6] 欧淑芳,叶兴成,王飞,等. P&C雨型在城市排水计算中的适用性分析[J]. 水电能源科学,2018,36(2):32-35.  
OU Shufang, YE Xingcheng, WANG Fei, et al. Applicability of Pilgrim & Cordery rainstorm pattern in urban drainage calculation [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(2):32-35 (in Chinese).
- [7] 朱勇年. 设计暴雨雨型的选用——以杭州市为例[J]. 中国给水排水,2016,32(1):94-96.  
ZHU Yongnian. Selection of design rainfall pattern: case of Hangzhou [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1):94-96 (in Chinese).
- [8] 杨星,李志清,李朝方,等. 同频率法设计降雨过程的安全裕度[J]. 水力发电学报,2013,32(6):19-23.  
YANG Xing, LI Zhiqing, LI Chaofang, et al. Safety margin for design hyetograph calculated by same-frequency amplification method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6):19-23 (in Chinese).
- [9] 李志元,黄晓家,何媛媛,等. 设计暴雨雨型推求方法研究[J]. 市政技术,2018,36(1):141-143.  
LI Zhiyuan, HUANG Xiaojia, HE Yuanyuan, et al.



- Research on derivation method of design rainstorm pattern [J]. *Water Supply & Drainage Engineering*, 2018, 36(1): 141 – 143 (in Chinese).
- [10] 金米娜. 江西省汛期暴雨气候特点及预报方法综合分析[J]. *气象与减灾研究*, 2009, 32(1): 69 – 72.  
JIN Mina. Comprehensive analysis on climatic characteristics and forecast methods of heavy rainfall in Jiangxi during flood-season [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2009, 32(1): 69 – 72 (in Chinese).
- [11] 张娟娟, 刘波. 2013年6月26—29日江西梅雨锋暴雨天气过程分析[J]. *气象与减灾研究*, 2014, 37(1): 55 – 60.  
ZHANG Juanjuan, LIU Bo. Analysis of a continuous heavy rainfall event occurred during 26 – 29 June 2013 in Jiangxi [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2014, 37(1): 55 – 60 (in Chinese).
- [12] 张小玲, 陶诗言, 张顺利, 等. 梅雨锋上的三类暴雨[J]. *大气科学*, 2004, 28(2): 187 – 205.  
ZHANG Xiaoling, TAO Shiyang, ZHANG Shunli, *et al.* Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(2): 187 – 205 (in Chinese).

作者简介: 唐明 (1972 – ), 男, 安徽桐城人, 博士, 高级工程师, 主要从事水旱灾害风险管理、城市水利研究。

E-mail: frankt@nit.edu.cn

收稿日期: 2020-03-12

修回日期: 2020-04-27

(编辑: 刘贵春)

(上接第96页)

- BAI Haifeng, LI Lijuan, XIANG Zhenlong, *et al.* Community structure and its relationship with environmental factors in zooplankton in Jinghe River system in Northwest China [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2015, 30(3): 291 – 297 (in Chinese).
- [13] 周晓梅. 滴水湖及其外围水体浮游动物群落结构比较研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2010.  
ZHOU Xiaomei. Comparative Study on Community Structures of Zooplankton in Dishui Lake and Its Surrounding Waters [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2010 (in Chinese).
- [14] PERHAR G, ARHONDITSIS G B, BRETT M T. Modeling zooplankton growth in Lake Washington: a mechanistic approach to physiology in a eutrophication model [J]. *Ecological Modelling*, 2013, 258: 101 – 121.
- [15] SERENA R, ANDREA G, KATHARINA W, *et al.* Increasing water temperature triggers dominance of small freshwater plankton [J]. *Plos One*, 2015, 10(10): e0140449.
- [16] MANO S R, DIVAKARAN S J, MOSES S A. Influence of water quality on plankton in tropical ponds: a multivariate analysis approach [J]. *Lakes Reservoirs*, 2017, 22(3): 267 – 277.
- [17] 冯世敏, 吴明姝, 熊莲, 等. 太平湖浮游动物动态演替与环境因子的相关性研究[J]. *水生生物学报*, 2017, 41(3): 700 – 711.  
FENG Shimin, WU Mingshu, XIONG Lian, *et al.* The research of dynamic succession of zooplankton and its correlation with environmental factors in Taiping Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(3): 700 – 711 (in Chinese).
- [18] 李志斐, 谢骏, 张晓可, 等. 珠三角高产养殖池塘浮游动物群落结构及水质评价[J]. *水生生物学报*, 2017, 41(5): 1071 – 1079.  
LI Zhifei, XIE Jun, ZHANG Xiaoke, *et al.* Community characteristics of zooplankton and assessment of water quality in aquaculture ponds of the Pearl River Delta [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(5): 1071 – 1079 (in Chinese).

作者简介: 李智 (1993 – ), 男, 四川德阳人, 硕士, 项目技术负责人, 主要研究方向为景观水体水质净化。

E-mail: 494404167@qq.com

收稿日期: 2019-03-14

修回日期: 2019-04-13

(编辑: 孔红春)