

论城市排水防涝工程水文问题

芮孝芳¹,蒋成煜²,陈清锦²

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 北京世纪千府国际工程设计有限公司江苏分公司,江苏 南京 210029)

摘要:排水防涝工程是防治和减轻城市洪涝灾害的重要设施,其建设规模主要受到工程寿命期内雨洪变化规律、社会经济发展水平的制约。论述了城市雨洪变化的特点、洪涝灾害的成因和不同类型工程措施的防灾、减灾原理;阐述了致灾率、设计标准等概念;提出了城市排水防涝工程规划、设计中的水文计算任务;讨论了城市设计暴雨所涉及的暴雨强度公式、设计暴雨雨型等问题以及由设计暴雨确定设计洪水的原理和方法。

关键词:城市水文问题;排水防涝工程;暴雨强度公式;设计暴雨雨型;产汇流计算

中图分类号:TV122⁺.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)01-0042-07

Hydrological problems for engineering of drainage and water log prevention in urban areas//RUI Xiaofang¹,JIANG Chengyu²,CHEN Qingjin² (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Century Chief International Architecture Design Limited Company, Jiangsu Branch, Nanjing 210029, China)

Abstract: Engineering of drainage and water log prevention is an important measure to prevent and mitigate the flood disasters. The scale of the engineering is mainly restricted by rain flood variation within the project life period and the level of economic and social development. This paper discusses the characteristics of the changes of city rainwater, the causes of flood disaster and disaster prevention and reduction principle of different types of engineering measures. Additionally, it also explains the concept of disaster probability and design standard and presents the hydrological calculation task about planning and designing of engineering of drainage and water log prevention in urban areas. By doing it so, it discusses the rainstorm intensity formula, design rainstorm hydrograph and other problems, which are involved in city design storm. Finally, it is described the principle and method of confirming design flood from design storm.

Key words: urban hydrology; engineering of drainage and water log prevention; rainstorm intensity formula; design rainstorm hydrograph; computation of runoff yield and concentration flows

城市雨洪是暴雨作用于城市下垫面的产物,是自然界常见的水文现象。一场一定时空分布的暴雨降落在城市区域形成的洪水与其地形、地貌、水系、土壤、植被、地质、水文地质、土地利用、现有工程设施等下垫面条件关系密切。城市雨洪是造成城市洪涝灾害的根本原因^[1]。通过兴建排水和防涝工程可以达到防治或减轻洪涝灾害的目的,而兴建的规模必须从工程寿命期内的雨洪变化规律、经济社会发展水平等方面加以考虑。城市雨洪的变化一般有两种表现:一是在一定时空分布暴雨形成的集水区汇水断面处的流量和水位表现为随时间连续变化;二是一年一轮回的水文循环产生的集水区汇水断面处的年最大流量、年最高水位、年最大时段洪量等时间序列表现为年际演变。对于前一种变化,应用物理学定律和水文学本构关系基本上能描述其动态规律,属于根据初始状态可以预知其未来状态的确定性现象。对于后一种变化,科学家至今尚未发现其

演变所服从的物理定律,认为是一种根据初始状态对其未来状态只能作概率预估的不确定性现象,可用概率论描述其统计规律。在城市排水防涝工程的规划、设计中,推求设计洪水或设计暴雨遵循统计规律^[2];由设计暴雨转换为设计洪水遵循动态规律^[3]。本文将基于这种认识,对颇具特色的城市排水防涝工程水文问题进行初步论述。

1 雨洪致灾率

1.1 排水不及时致灾率

对城市排水的一般要求是:当城市遭遇暴雨时,地面无积水或者积水深、积水历时不超过一定的允许值。因此,如果地面产生积水或积水深、积水历时超过允许值,就认为发生了排水不及时而致灾。令集水区的排水能力为 q ,暴雨形成的某时刻洪水流量为 Q 。如果发生了事件 $\{Q \geq q\}$,那么就遭遇排水不及时带来的灾害;反之,就不会出现由于排水不及

时造成的灾害。

水文学已经揭示:地球绕太阳公转一周即一年,就是水文循环一个轮回。如果将水文循环一年一轮回视作一次随机试验,那么在每次试验中就可观测到城市任一集水区的降雨量及其所形成的洪水流量在一年中随时间的变化过程,取其中最大者为年最大值,经过 n 年观测,就可得到由年最大流量 Q_m 组成的年时间序列 $\{Q_{mi}, i=1, 2, \dots, n\}$,假设这种时间序列的演变服从统计规律,就可用分布函数或频率曲线来描述它的年际演变规律,如图 1 所示。这样,如果某年集水区的最大流量 Q_m 小于集水区的排水能力 q ,即出现事件 $\{Q_m < q\}$,那么该年就不会因排水不及时致灾;而如果出现事件 $\{Q_m \geq q\}$,那么该年就会因排水不及时而致灾。根据集水区年最大流量 Q_m 频率曲线即可求得事件 $\{Q_m \geq q\}$ 发生的概率 $P\{Q_m \geq q\}$ (图 1)。概率 $P\{Q_m \geq q\}$ 就称为排水不及时致灾率,其倒数就是事件 $\{Q_m \geq q\}$ 出现的平均间隔年数,称为排水不及时重现期。

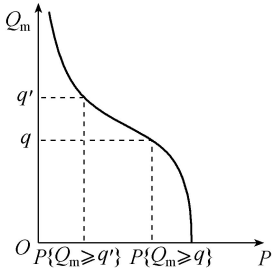


图 1 洪峰流量频率曲线

1.2 内涝致灾率

对城市防涝的一般要求是:当城市遭遇暴雨时,排水不畅的低洼地区不淹水或者淹水深、淹水历时不超过一定的允许值。因此,当低洼地出现淹水或淹水深、淹水历时超过允许值,就认为是内涝致灾。令低洼地的排水能力为 q ,暴雨形成的向低洼地汇集的洪水过程为 $Q(t)$ 。如果出现 $q \geq Q(t)$ 情况,那么低洼地不可能淹水,即不会出现内涝,如图 2(a) 所示;但如果出现图 2(b) 所示的情况,就会在历时 T 内产生内涝水量 V :

$$V = W_{T_{\text{调}}} - T_{\text{调}} q \tag{1}$$

式中: $T_{\text{调}}$ 为调洪历时; $W_{T_{\text{调}}}$ 为历时 $T_{\text{调}}$ 内的洪水量。

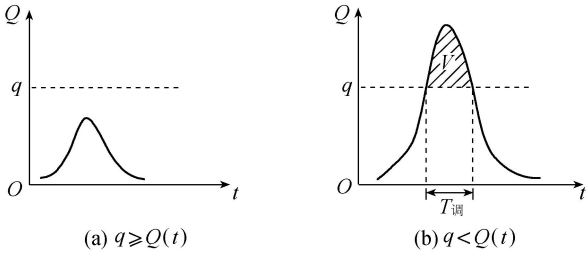


图 2 削平头调洪方式

由式(1)可知,如果某次暴雨洪水出现 $V > 0$ 的情况,那么就意味着会发生内涝,否则将不会发生内涝。式(1)适用的条件是削平头调洪方式,这是一种最优的调洪方式,即对同样的雨洪过程和排水能力,该方式可以使内涝积水量最小。

与前述类似,如果以水文循环一年一轮回作为一次随机试验,那么就可以得到每年汇入低洼地区的雨洪过程,如图 3 所示。据此,按式(1)就可以求得排水能力为 q 的每年最大内涝水量 V_m ,经过 n 年观测就可得到 V_m 的时间序列 $\{V_{mi}, i=1, 2, \dots, n\}$ 。由概率论可知,由于雨洪年时间序列服从统计规律,因此作为其函数的 V_m 也服从统计规律,并可用图 4 所示的一组不同 q 的 V_m 频率曲线来描写。图中频率曲线与横坐标的交点对应的频率就是一定 q 情况下的内涝致灾率。 q 越大,内涝致灾率越小,即内涝的发生概率越小,其倒数就是内涝重现期。

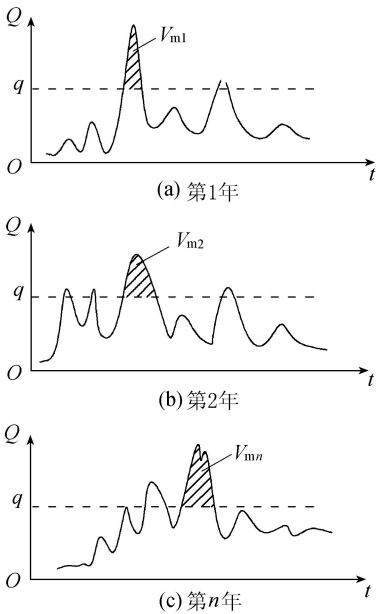


图 3 历年雨洪过程及排水能力一定的年最大内涝积水量

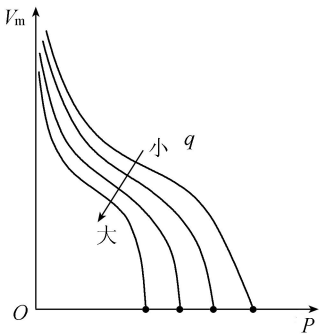


图 4 不同排水能力的年最大内涝水量频率曲线

1.3 工程失事率

上述排水不及时致灾率和内涝致灾率都反映了一个城市在一定下垫面条件和工程背景下未来可能发生洪涝灾害的概率。一切可以减小排水不及时致

灾率和内涝致灾率或者可以减轻灾害损失负担的方式方法,均可视为城市防灾减灾措施,它可以分成工程措施和非工程措施两类。能减小排水不及时致灾率和内涝致灾率而采取的市政工程措施称为工程措施,其他措施统称为非工程措施。

工程措施又分为两类:其一为增加排水能力的工程措施。对于排水工程,由于通过改善排水系统可使其排水能力从 q 提高至 q' ,因此即使不改变集水区年最大流量 Q_m 频率曲线,也能达到减小排水不及时致灾率的目的(图1)。对于防涝工程,随着排水能力不断提高,内涝水量 V_m 频率曲线将不断改变,内涝致灾率 $P\{V_m>0\}$ 将不断减小(图4)。其二为改变下垫面条件的工程措施。这类市政工程措施很多,例如增加透水地面比例的工程,开辟具有滞蓄洪功能的调蓄池、深层调蓄隧道和下凹式绿地、湿地等。图5为地面透水性对集水区年最大流量 Q_m 频率曲线的影响,可见,即使集水区排水能力没有增加,也会因为下垫面透水性的增加而使得排水不及时致灾率有所减小。对于防涝工程,由于下垫面条件的改变会导致集水区年最大内涝水量 V_m 频率曲线发生改变,例如滞蓄洪就会对内涝水量 V_m 频率曲线产生影响(图6),因此即使集水区排水能力没有增加,也会因滞蓄洪作用的加大而使内涝致灾率有所减小。在工程实践中,一般不会采用单一类型的工程措施减小排水不及时致灾率和内涝致灾率,具体采用何种复合工程措施,必须通过方案比选。

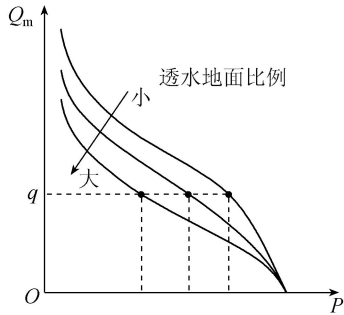


图5 透水地面比例不同的洪峰流量频率

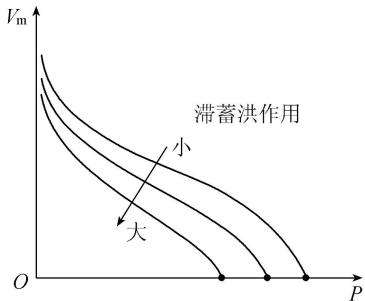


图6 不同滞蓄洪作用的年最大内涝积水量频率曲线

城市排水防涝工程是以洪水为运行环境、以水荷载为主要受力的,洪水对这些涉水工程是一种破

坏力,可用洪水位作为衡量指标。工程结构具有抗御洪水破坏的能力,也可换算成一种“水位”。令洪水位为 H ,工程结构抗御洪水破坏的能力为 h 。如果出现 $H\geq h$,那么涉水工程就有失事的可能;反之,涉水工程将安然无恙。与前述同样的理由,年最高水位 H_m 构成的年时间序列 $\{H_{mi}, i=1,2,\cdots,n\}$ 也可用统计规律描述。因此,根据年最高水位频率曲线(图7)就可由已知的 h 求得工程失事率 $P\{H_m\geq h\}$,其倒数就是工程失事重现期。

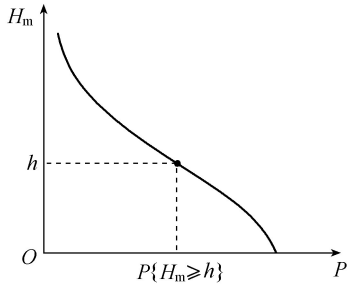


图7 洪峰水位频率曲线

2 设计标准及工程水文计算任务

2.1 设计标准

不难理解,排水防涝工程的规模越大,其减小排水不及时致灾率和内涝致灾率的效果越好,防灾减灾的效益就越大,但相应的工程造价就越高,失事造成的损失可能较大。因此,采用工程措施防灾减灾必然要以经济技术可行性为制约,在工程投资、工程效益和失事损失之间进行博弈,通过博弈从中寻求一个合理的平衡作为确定设计标准的依据。因此,所谓设计标准就是指据此修建的工程规模能使排水不及时致灾率或内涝致灾率或工程失事率减小到当时经济社会发展水平可以接受的数值。为了区别,将排水不及时致灾率可接受的数值称为排水设计标准,简称排水标准;将内涝致灾率可接受的数值称为防涝设计标准,简称防涝标准;将涉水工程失事率可接受的数值称为安全设计标准,简称安全标准。显然,安全标准不得小于排水标准或防涝标准。排水标准、防涝标准和安全标准通常由国家制定,并以规范的形式予以颁布^[4]。

2.2 工程水文计算任务

由以上分析可知,为确定城市排水设计流量,应先求出集水区的洪峰流量 Q_m 频率曲线,然后按给定的排水标准确定之;为确定城市防涝工程规模,应先求出最大内涝水量 V_m 的频率曲线,然后按给定的防涝标准确定内涝水量并安排其出路;为确定涉水工程设计水位,应先求出洪峰水位 H_m 频率曲线,然后按给定的安全标准确定之。因此,在城市排水

防涝规划、设计中,水文计算的任务就是推求集水区的设计洪水,包括设计洪峰流量(水位)、设计洪量、设计洪水过程线等。

基于概率论和数理统计理论推求设计洪水,一般有两条途径:一是根据实测流量资料系列直接推求设计洪水;二是先根据实测暴雨资料系列推求设计暴雨,然后通过流域产汇流分析计算将设计暴雨转换成同频率的设计洪水。

3 暴雨强度公式问题

在城市排水防涝工程规划、设计中,集水区洪峰流量一般采用下列合理化公式计算:

$$Q_m = CIA \quad (2)$$

式中: I 为暴雨强度; A 为集水区面积; C 为综合系数。

式(2)由谁先提出,这在 20 世纪 60 年代之前曾经有过争议^[5]。美国的文献称是美国人 Kuichlin 于 1889 年首先提出的,英国的文献称是英国人 Liloyd-Davies 于 1906 年首先提出的。但著名水文学家 Dooge 仔细考证后发现是爱尔兰人 Mulvany 最早提出了合理化公式,时间是 1850 年,这要比 Kuichlin 和 Liloyd-Davies 提出合理化公式分别早 39 年和 56 年。Mulvany 是基于什么样的原理提出合理化公式的?式(2)中的雨强指何雨强?综合系数是何意义?这些,现在都已经无法考证清楚了,但 20 世纪 30 年代以来发展起来的产汇流理论却可以对其合理性作出令人满意的解释^[3,6]。

根据等流时线概念,暴雨过程形成的集水区汇水断面的洪水过程可表示为

$$Q(t) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^m h_i a_{t-(i-1)} \quad (3)$$

其中 $\Delta t = \tau_m/n$
 式中: Δt 为选取的计算时段长,它与相邻等流线之间的汇流时间相同; h_i 为第 i 时段内的净雨量,是降雨量与降雨损失量之差; $a_{t-(i-1)}$ 为第 $t-(i-1)$ 块等流时面积; m 为净雨时段数; n 为等流时面积块数; τ_m 为集水区最大汇流时间; t 为出流的时刻, $t=1,2,\dots,p$,其中 $p=m+n-1$ 。

由式(3)得暴雨过程形成的集水区汇水断面洪峰流量为

$$Q_m = \max\{Q(t)\} = \max\left\{\frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^m h_i a_{t-(i-1)}\right\} \quad (4)$$

具体而言,若净雨时段数 m 大于或等于等流时面积块数 n ,则参与形成洪峰流量的是全部集水区面积和集水区最大汇流时间内最大净雨量,如图 8(a) 所示;若 m 小于 n ,则参与形成洪峰流量的是全部净雨

和净雨历时内最大的集水区面积,如图 8(b) 所示。

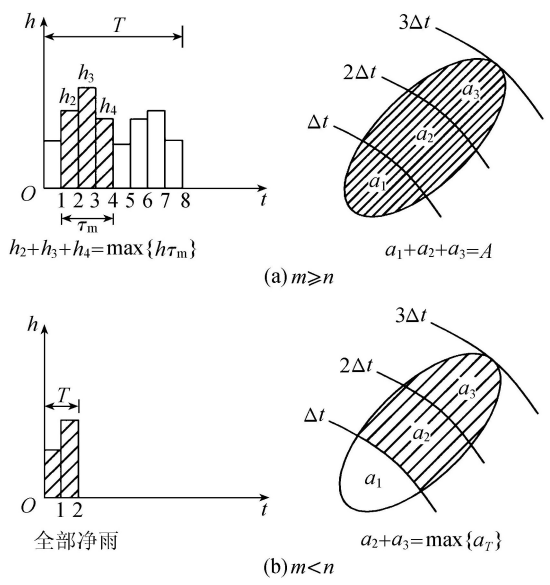


图 8 基于等流时线的雨洪形成

城市集水区面积及其最大汇流时间一般较小,形状也可概化为矩形,遭遇的暴雨几乎都是净雨历时大于或等于集水区最大汇流时间,即 $m \geq n$ 的情况,因此,式(4)可化简为

$$Q_m = (h_{\max}/\tau_m)A \quad (5)$$

式中: $h_{\max}$ 为 τ_m 历时内最大净雨量; $h_{\max}/\tau_m$ 即为 τ_m 历时内最大平均净雨强度。若用 τ_m 内最大平均雨强 I 与系数 C 的乘积,即 CI 表示 $h_{\max}/\tau_m$,式(5)就变为 Mulvany 给出的合理化公式(2)了。

从以上解释中,不仅可以看出式(2)适用的集水区面积不宜太大,应有一个合理范围,而且还可以看出式(2)中的 I 指的是最大汇流时间内最大平均雨强,综合系数 C 实际上反映了降雨损失和流域调蓄作用对雨峰形成为洪峰流量的影响。传统上将 C 仅仅理解为径流系数是不全面的,说成洪峰径流系数也是理论上的误解,因为洪峰的形成除了与雨峰和降雨损失有关外,还与流域的调蓄作用有关,洪峰与雨峰的比值是不符合径流系数的物理意义的。

在式(2)中, A 是一个确定性变量, C 一般也可视为确定性变量。因此,式(2)所表达的仅是两个随机变量 Q_m 和 I 之间的函数关系。根据概率论中随机变量函数的分布理论可知, Q_m 的出现频率与 I 的出现频率相同。这就是说,若要推求某一频率的 Q_m ,只需先求得相应于该频率的 I 就可以了。如果集水区布设有自记雨量站,并且已经积累了足够年数的实测暴雨资料,那么就可以根据该集水区最大汇流时间 τ_m ,摘取每年 τ_m 历时内最大平均暴雨强度构成统计样本,并进行频率计算即可达到目的。

但一个城市一般可以包括为数众多集水区,不

可能在每个集水区都布设自记雨量站;这些集水区的 τ_m 也不可能相同。在这种情况下,按前述步骤推求每个集水区的设计暴雨必然存在困难且十分烦琐。水文学家从资料分析中发现,一个雨量站点的同频率不同历时最大暴雨平均强度随历时的增加而呈递减趋势,几乎是一条光滑曲线(图9),可用下列数学函数来拟合:

$$I = S_p / T^n \tag{6}$$

或 $I = S_p / (T + b)^n \tag{7}$

式中: T 为历时; S_p 称为雨力; n 为暴雨强度递减指数; b 为经验参数。

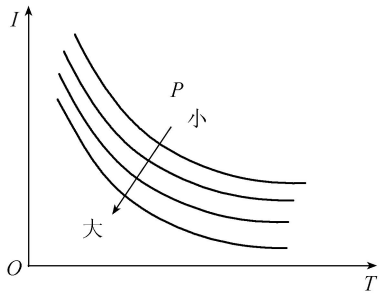


图9 不同频率的 $I-T$ 曲线

式(6)或式(7)中的雨力 S_p 是频率 P 或重现期的函数,与理论分布线型有关。可以证明,对于指数型分布, S_p 与 $\ln P$ 呈线性关系;对于耿贝尔分布, S_p 与 $\ln[-\ln(1-P)]$ 呈线性关系;对于 $P-III$ 分布, S_p 不仅与 P 有关,而且与 C_s 有关,其关系难以表达成解析形式^[7]。我国目前普遍使用的城市暴雨强度公式^[4]为

$$i = A'(1 + C'\ln P) / (b + T)^n \tag{8}$$

式中 A' 、 C' 为经验参数。

显然,式(8)仅适用于指数型分布。若暴雨频率分布采用 $P-III$ 型分布,而暴雨公式采用式(8),则在理论上是自相矛盾的。研究发现,暴雨强度公式包含的参数与历时或地理位置有一定关系。因此,揭示这些参数时空分布特点,可为暴雨强度公式用于内插、外延和移用提供科学基础。暴雨强度公式是一个集暴雨统计规律与平均暴雨强度随历时增加而递减规律于一体的综合表达式,虽出自工程所需,但也是对暴雨规律的一种科学认识和概括。

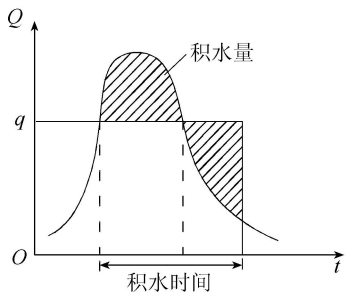
4 设计暴雨雨型问题

笔者发现,目前在工程界和学术界对设计暴雨雨型的认识或理解大概有3种:一是指设计标准情况下的暴雨过程线;二是指发生概率正好等于设计标准的暴雨过程线;三是指按此确定的工程规模能达到设计标准的暴雨过程线。

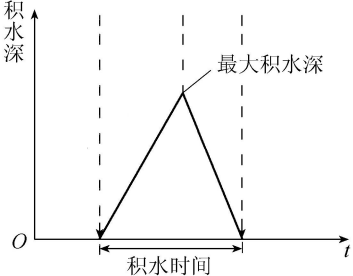
基于第1种认识或理解,首先必须解决场次暴

雨的识别问题。由于暴雨强度的变化和暴雨间隔时间均有很强的随机性,试图将发生在一年之中的暴雨强度随时间变化划分成若干场暴雨就显得十分困难,无奈之中只能作出一些硬性规定,例如将间隔时间大于或等于2h的算作两场暴雨等。在获得了场次暴雨样本后,人们又会面临着如何统计分析才能得到符合设计标准的暴雨过程线问题。一般的做法是先分析能反映暴雨过程的一些特征值,例如雨峰位置、一场暴雨的历时、单雨峰或多雨峰等统计特征,然后选择它们中的一种组合作为设计暴雨雨型。基于第2种认识或理解,就是将自然界发生的场次暴雨作为随机过程,每一场次暴雨过程的出现都有一个概率与之对应。然后选择一条出现概率为设计标准的暴雨过程线作为设计暴雨雨型。

笔者认为,以上两种认识和理解,在理论上是比较模糊的,在实际应用中也存在相当的不确定性或任意性。众所周知,在城市中修建排水防涝工程,目的是期望工程建成后能确保城市的排水能力和防涝能力达到设计标准,使原先较高的雨洪致灾率减小到设计标准所相应的频率。对于城市内涝问题,这种分析已在第1.2节详细讨论了(图4)。对于城市排水问题,如果允许在一定时间内可以有一定的积水,那么也会提出类似的问题。因为有了暴雨雨型才能求出集水区洪水过程线,有了集水区洪水过程线才能确定一定排水能力条件下是否会积水、积水有多深、积水时间有多长等(图10)。这样就可求得不同排水流量的地面积水量频率曲线(图4)。根据图4可回答排水防涝规划、设计中遇到的3类问题:①已知 q 、 P 求 V ;②已知 V 、 P 求 q ;③已知 P 求 q 与



(a) 积水量过程



(b) 积水深过程

图10 雨洪过程中的地面洪水过程

V 的合理配合。虽然利用概率论方法(又称功能函数法)或数理统计法(又称系列操作法)可以从理论上求出图 4,但由于计算量庞大而复杂,加之一般不具备必须的资料条件,因此,就提出了能否不必求出图 4 也能解决以上 3 类问题的问题,设计暴雨雨型的第 3 种认识和理解就是在这样的背景下提出来的。

笔者认为以上第 3 种对设计暴雨雨型的认识与理解不仅明确,而且正确。事实上,对于第 1 种认识和理解,人们不禁要问为什么符合设计标准的暴雨雨型就是这样统计出来的呢?为什么不同设计标准的设计暴雨雨型就是常遇雨型或者偏于安全的雨型呢?对于第 2 种认识和理解,人们容易看出,由于作为随机过程的暴雨雨型必须依靠多维分布函数来表达其统计规律,其维数与截口数相同,这样就必然会出现这样一个问题,发生概率等于设计标准的暴雨雨型有无穷多个,试问在这无穷多个概率等于设计标准的暴雨雨型中,是否存在一条按其规划设计排水工程和防涝工程就能达到设计标准的雨型呢?如果存在,那么怎样就像从大海中捞针一样将它找出来呢?

在设计洪水过程线的研究中也遇到与上述类似的问题。本文第一作者曾在文献[8]中证明同倍比法和同频率法是基于第 3 种认识和理解得到的两个确定设计洪水过程线的方法。分析表明,对于同倍比法,只要根据每年由不同历时年最大值虚拟成的洪水过程线之间的关系(图 11),按同倍比法求得的设计洪水过程线确定防洪工程规模就会符合设计标准,但这样的情况是不易出现的。因此,就必须在选择设计时段和典型洪水过程线上多下功夫。对同频率法,只要每年由不同历时年最大值虚拟成的洪水过程线之间的关系(图 12),按同频率法求得的设计洪水过程线确定防洪工程规模就会符合设计标准,这样的情况虽也不易出现,但已经证明,一旦不出现这种情况时,所得结果必略有偏小。因此结论是:只要慎用,同倍比法和同频率法都是值得推荐的确定设计洪水过程线的方法^[9]。由于设计洪水过程线是由设计暴雨雨型经产汇流而来的,因此笔者认为

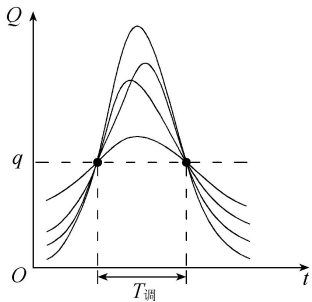


图 11 $T_{调}$ 相同的雨洪过程线

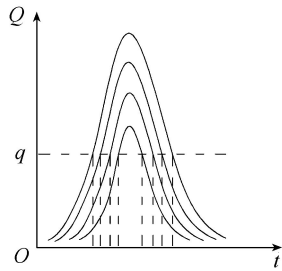


图 12 $T_{调}$ 不相同的雨洪过程线

在确定设计暴雨雨型时,同倍比法和同频率法也是值得推荐的。

前人曾对城市设计暴雨雨型做过多种研究,因而出现了许多确定设计暴雨雨型的方法^[10]。例如 Keifer 和 Chu 于 1957 年提出按同频率不同历时平均雨强拟定设计暴雨雨型,即芝加哥法,也称 K. C 法;Hershfield 于 1962 年提出按统计分析得到的降雨时程分配确定设计暴雨雨型,称为 H 法;Huff 于 1967 年提出按最大雨强出现位置统计出的 4 类雨型中发生频率较高的雨型确定设计暴雨雨型,称为 Huff 法;Pilgrim 和 Cordery 于 1975 年提出先确定按时段暴雨量大小在本次暴雨中时段排序号,然后通过确定各次暴雨的时段暴雨量为第一、第二、第三等的时段排序号平均值来确定设计暴雨雨型,称为 P. C 法。这些方法在具体统计分析上虽具个性,但按照前述第 3 种对设计暴雨雨型的认识和理解,K. C 法是同频率法,其他方法实际上只是提出了确定典型雨型的方法,若采用同倍比确定设计暴雨雨型,它们就是同倍比法;若采用同频率确定设计暴雨雨型,它们就是同频率法。由于同倍比受到典型雨型影响较大,因此,对于以上除 K. C 法以外的方法,若采用同倍比法就可能得出不同的结果,但若采用同频率法,则由于其基本不受典型雨型影响,以上所有方法结果就会基本一致。

5 产汇流计算问题

城市排水防涝规划设计应以设计洪水为依据,但由于城市集水区几乎都缺乏实测流量资料,因此由设计暴雨推求设计洪水就成为城市排水防涝规划设计中确定设计洪水的主要途径。其中由降雨量转换成净雨量或产流量的物理阶段称为产流阶段。产流阶段是降雨量在数量上的重新分配或再分配,关心的是净雨量或产流量的形成,涉及的水文过程有下渗、土壤水分变化、蒸散发、截留、填洼等。流域产流主要受控于水量平衡。由净雨过程或产流量过程转变为集水区洪水过程的物理阶段称为汇流阶段^[3,6]。汇流阶段是净雨过程或产流量过程在时间上的重新分配或再分配,关心的是不同径流成分的

汇集过程。如果着眼于流域平面结构,那么坡地汇流阶段涉及的水文过程有坡地汇流和河网汇流。坡地汇流将净雨过程或产流量过程转换成河网总入流过程,河网汇流则将河网总入流过程转换成集水区洪水过程;如果着眼于坡地的剖面结构,那么坡地汇流阶段涉及的水文过程包括地面水汇流、壤中水汇流和地下水汇流,如图 13 所示。流域汇流除了受水量平衡制约外,还必须受流域下垫面调蓄作用的支配。

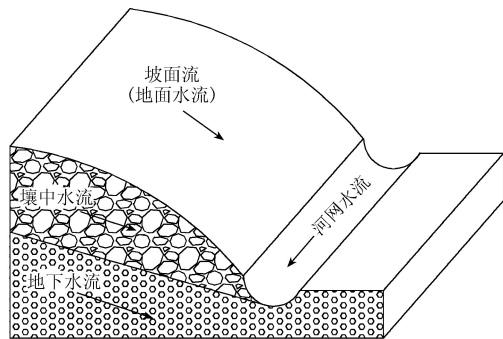


图 13 集水区不同径流成分的汇集

与天然流域相比,由于城市化的强烈干预,城市集水区的产流和汇流具有以下一些特点:

a. 分水线由自然地形、地貌和人造路网、地物等构成,比较复杂,也易受到人为干预而发生改变。下垫面土地利用虽多样化,但多数仍比较容易掌控。由于地下空间和地下管网的存在,地面与地下的关系不是由下渗维系,而是水流直接相通。

b. 酿成城市地区洪涝灾害的主要是地面径流,因此分析降雨所形成的地面净雨或地面产流量是城市产流计算的主要任务,下渗曲线法就成为城市集水区基本的产流量计算方法。当采用径流系数法简化这种计算时,径流系数应该指地面径流系数。

c. 坡面汇流一般是城市集水区汇流的主要部分,河网汇流往往可以不予考虑。但集水区地下有管网,坡面通过受水口和检查井与地下管网垂向串联是城市集水区汇流的一大特点。管网汇流通常采用水力学方法,但近几年来,也有人尝试采用水文学方法^[10]。管网汇流速度一般快于坡面汇流和河网汇流,是城市化汇流加快的主要原因。

d. 城市集水区的面积一般很小,以致集水区范围内降雨的空间分布一般比较均匀,点雨量可以代替面雨量,一般不需做点面关系分析。集水区长度一般也不大,其最大汇流时间仅为几分钟或十几分钟,调蓄作用一般可以忽略不计。由于这些原因,对于很小的城市集水区,地面洪水过程与地面净雨过程近似,地面洪峰流量与净雨强度峰值近似。只有当流域调蓄作用不可忽略时,才必须选择合适的产汇流计算方法来推算由暴雨过程形成的洪水过程线。

产汇流理论融入城市产汇流特点就形成了城市

产汇流计算方法或城市雨洪数学模型^[11-12]。

6 结 语

在城市排涝工程规划、设计中,必然要涉及暴雨洪水问题。这个问题既不是单纯的气象问题,也不是单纯的水文问题,而是一个工程水文问题。笔者认为,应当从水文、气象与城市排水防涝工程的结合上寻找解决规划设计中遇到的暴雨洪水问题的途径和方法。本文首先论述了城市雨洪变化特点、洪涝灾害的成因及排水防涝工程措施的防灾减灾原理;将暴雨洪水的年际变化视作一种服从统计规律的随机现象,阐述了致灾率、排水标准、防涝标准、安全标准等概念;然后提出了城市排水防涝工程规划、设计中的水文计算任务;论述了城市设计暴雨推求方法和由设计暴雨推求设计洪水的方法。城市水文学是工程水文学的重要分支。城市化进程的加快,使城市水文面临极好的发展机遇。笔者期待更多的水文工作者关注、研究此类问题并取得更多更好的研究成果,谨以此文抛砖引玉。

参考文献:

- [1] 芮孝芳,蒋成煜. 中国城市排水之问[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu. Problems of urban drainage in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5):1-5. (in Chinese))
- [2] 丛树铮. 水科学技术中的概率统计方法[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:高等教育出版社,2013.
- [4] GB50014—2006 室外排水规范[S].
- [5] DOOGE J C I. Linear theory of hydrologic systems[M]. Washington D. C.:USDA,1973.
- [6] 芮孝芳. 产汇流理论[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [7] 陆泳舟. 南京暴雨基本规律及暴雨强度公式研究[D]. 南京:河海大学,2010.
- [8] 芮孝芳,张超. 论设计洪水计算[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):20-26. (RUI Xiaofang, ZHANG Chao. Research on design flood calculation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1):20-26. (in Chinese))
- [9] SL44—1993 水利水电工程设计洪水计算规范[S].
- [10] 张小娜. 城市雨水管网暴雨洪水计算模型研制及应用[D]. 南京:河海大学,2007.
- [11] MAIDMENT D R. Handbook of hydrology [M]. New York:Mcgraw-Hill, Inc. 1992.
- [12] SINGH V P. Hydrologic systems: rainfall-runoff modeling [M]. New York:Prentice Hall, Inc. ,1988.

(收稿日期:2014-10-11 编辑:周红梅)