

中小流域设计暴雨雨型研究进展

严正宵^{1,2,4}, 夏军^{1,3,4*}, 宋进喜^{1,4}, 赵玲玲², 庞国伟¹

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 广州地理研究所, 广州 510070; 3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 4. 陕西省地表系统与资源环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘要:设计暴雨是缺乏流量数据的中小流域推求设计洪水的基础,对水利工程设施、市政工程设计等建设标准具有重大影响,国内外对此展开了大量研究。近年来由于气候和环境变化的影响,洪水频发且流量极大,山洪和城市内涝灾害对山区人民和城市居民的财产及人身安全构成了威胁,引起了多起严重事故,因此对设计暴雨雨型提出了更高的要求。论文系统总结了典型暴雨雨型选择的原则与方法和雨型分类方法,梳理了相关方面的国内外雨型推求方法及其特点,包括芝加哥雨型法、Huff雨型法、三角形雨型法、Pilgrim & Cordery雨型法等4种短历时设计暴雨雨型,以及长历时的SCS雨型与同频率分析法;最后提出了中小流域设计暴雨雨型存在的问题并对未来研究方向进行展望。

关键词:设计暴雨雨型;时程分配;推求长短历时暴雨雨型;中小流域

中小流域一般指流域面积不超过1000 km²的流域^[1]。中小流域绝大部分河流缺少长时间序列的流量实测资料^[2-3]。即便个别河流有较长时间序列的流量资料,但很多早期年份的流量数据不全不准并有遗漏,很难通过流量资料推求设计洪峰以及不同时段的设计洪水流量,也就是说几乎不能通过频率计算得到设计洪水^[4]。因此,大多数中小流域多由暴雨资料推求设计洪水^[3,5-6]。

利用暴雨资料推求设计洪水,主要包括设计暴雨、产流计算、汇流计算等,其中设计暴雨推求包括确定点面暴雨量折减关系、计算暴雨强度公式和设计暴雨雨型^[7-8]。设计暴雨雨型,简称设计雨型,是设计暴雨强度在不同降雨历时内时间尺度上的分配过程,也就是暴雨强度随时间变化的情况^[9-10]。在暴雨事件进行的过程中,通过暴雨特征影响最大洪峰径流量的主要因素是最大暴雨强度、平均暴雨强度以及暴雨强度的过程^[11]。暴雨强度公式中可

以计算出暴雨在历时长内最强时段的强度与平均强度,但其并不描绘暴雨强度随时间尺度变化的过程,而表示降雨历时长内不同雨强的变化过程,即雨型,对径流曲线有着非常重要的影响^[12-14]。因此国内外学者对此进行了大量研究,其中也包括很多复杂、新兴的方法。如:Goswami等^[15]利用人工神经网络建立模型用于预测暴雨雨型;朱秀迪等^[16]利用Circular统计法研究多时间尺度降雨特征并分析雨型;张建平等^[17]通过引入量化指标建立暴雨衰减指数来设计雨型;Yeh等^[18]利用主成分分析法结合聚类分析技术和层次分析法设计雨型;Grimaldi等^[19]通过多变量方法分析观测雨量数据,并利用3-Copula函数定义了三元联合分布设计暴雨雨型;Liu等^[20]基于概率密度函数与Copulas联结函数设计了一种多变量分析方法;Cowpertwait等^[21]对泊松聚类过程点雨量雨型模型中的最佳参数估计问题进行了优化及验证;Müller等^[22]运用乘积随机级联模

收稿日期:2019-04-11;修订日期:2019-05-29。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502506)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC1502506.]

第一作者简介:严正宵(1995—),男,天津人,硕士生,主要从事水文水资源研究。E-mail: yanzhengxiao666@gmail.com

*通信作者简介:夏军(1954—),男,湖北孝感人,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要从事水文水资源等方面研究。
E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

引用格式:严正宵,夏军,宋进喜,等. 中小流域设计暴雨雨型研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(7): 1224-1235. [Yan Zhengxiao, Xia Jun, Song Jinxi, et al. Research progress on design hyetographs in small and medium-scale basins. Progress in Geography, 2020, 39(7): 1224-1235.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.07.014

型(Cascade mode)将降雨数据通过均匀分裂法分解,以生成设计雨型的时间序列,等等。但大多数新兴方法尚处于理论探索阶段,对尺度上和地域上的适应性还需界定后再进一步验证。目前使用较多并被广为认可的雨型设计方法为芝加哥雨型法、Huff雨型法、三角形雨型法、Pilgrim & Cordery法和同频率分析法等。

中国洪水发生极少是因冰雪融水造成的,大部分地区洪水发生都因较短时间的突发暴雨或长时间的持续降水所造成^[23]。并且很多中小流域的流量资料短缺,不足以直接通过长序列的流量数据推求设计洪水^[24],因此,在很多水文站分布较稀疏地区需选用长序列的降雨资料来推求设计洪水^[4]。设计雨型为洪水过程线的计算、水利工程标准等提供了设计标准。设计合适的雨型还可以输入到水文模型中,给模型提供准确的输入元素,为之后进一步的流量计算以及工程设计做铺垫^[25-27]。近年来由于气候变化等因素的影响,极端天气事件增多导致洪水事件发生频率升高,不论是山洪灾害还是城市内涝灾害,都对灾区人民人身安全和国民经济造成了极大的危害^[28-36]。解决洪水问题迫在眉睫,因此进行暴雨雨型设计的研究具有重要的现实意义。本文总结论述了中小流域设计暴雨时程分配的研究方法,主要包括典型暴雨选择的原则与方法、雨型分类方法、推求短历时设计暴雨雨型与长历时设计暴雨雨型方法,以期后续暴雨雨型的深入研究提供具体可行的理论方法与发展方向。

1 典型暴雨雨型选择原则与方法

最典型的设计暴雨雨型应概括大多数流域内暴雨事件的雨型,这样的设计雨型需从该流域实际的暴雨统计数据而得。每场暴雨雨型都不可能完全相同,其中最具有代表性的雨型、有最大可能性会发生的雨型应从水文气象站中实测资料提取总结,用来作为大部分暴雨雨型的平均特征^[37-39]。经由暴雨统计数据总结而得的典型暴雨事件雨型的降雨历时、雨峰个数和雨峰位置去推求设计暴雨雨型的特征,所得到雨型的结果最为精确,所以需要从暴雨事件的统计结果中筛选出典型暴雨事件^[40]。

1.1 选择典型暴雨的原则

典型暴雨的选取原则主要遵循“是否在该流域有代表性”和“是否在工程中有所不利”的原则——

需要所设计的雨型不仅应在此流域条件下最为典型、发生频率相对最高,而且对水利工程设计标准或防洪标准相对不利^[41-42]。

在流域中的代表性主要从以下2个方面考虑,一是雨量应最接近此流域的暴雨雨量;二是雨型在绝大多数的典型暴雨中,最常见的实际降雨历时、雨峰位置以及雨峰个数应与所设计的雨型相近^[43-44]。而对工程有所不利主要指设计雨量应该更为集中,这样设计暴雨所造成洪水的过程线的洪峰会比较大;还应将主雨峰尽量延迟靠后,这样形成的洪峰出现时间会延后,对下游受灾区或水利工程设施的破坏将会更大。这样设计主要是由于中国水利水电工程设计对重现期要求相对较高,大多至少为50年一遇,有的甚至上百年、上千年。并且重要的水利工程一旦出现较大问题,对社会经济会造成不可估量的损失,所以用这种雨型所设计防洪措施或水利工程等工程设施将更加安全^[45-48]。

1.2 选择典型暴雨的方法

选择典型暴雨的方法主要有3个:①从设计流域中的年最大雨量过程中选择;②资料不足时,可选用流域内或附近的点雨量过程^[49];③无资料时,可查水文手册或各省暴雨径流查算图表,选用适宜地区综合概化的典型暴雨过程^[50-52]。

2 雨型分类方法

目前,雨型的分类方法主要有2种。一是目估法,指通过计算机绘出的降雨过程以折线图、曲线图等方式进行目估判断得到,由于降雨过程变化随机性很强,该方法虽简单易行,但是容易产生人为误差^[12]。随着计算机应用更加广泛,现在多数应用第二种方法——模糊识别法^[53]。模糊识别法是将一场降雨事件分为多个时间段,计算各段时间的雨量分别占总雨量的百分比,进而建立降雨过程的模糊矩阵,将建立完成后的模糊矩阵与降雨过程进行对比,最后通过就近原则确定雨型的种类^[54]。

早在19世纪50年代,苏联包高马左娃^[55]根据雨量分配和雨峰位置等降雨资料应用模糊识别法在乌克兰等地进行研究,划分了大约7种雨型(图1),包括均匀雨型、单峰雨型和双峰雨型。其中第Ⅰ类为前雨峰单峰雨型,第Ⅱ类为中雨峰单峰雨型,第Ⅲ类为后雨峰单峰雨型;第Ⅳ类为均匀分布雨型;第Ⅴ类、第Ⅵ类和第Ⅶ类为双峰雨型。通过

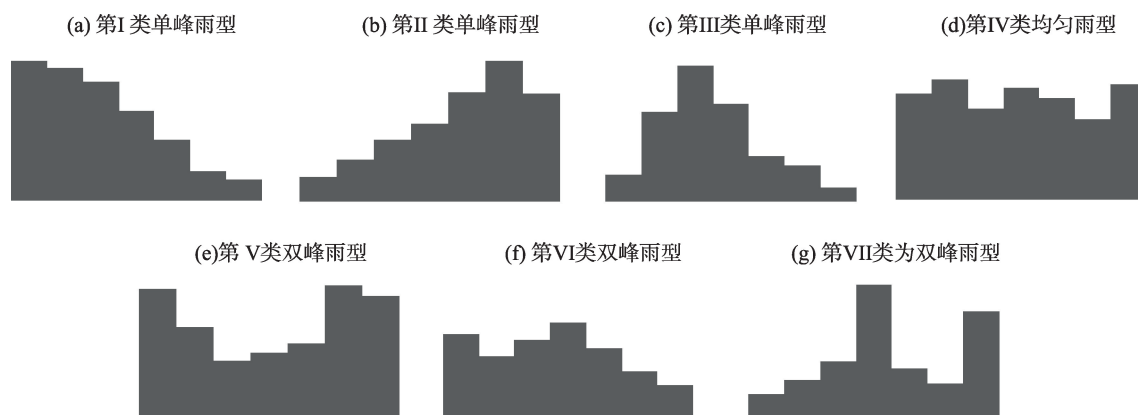
图1 包高马左娃^[55]划分的7种雨型概念图

Fig.1 Seven types of hyetographs defined by Molokov

降雨事件中各时段降雨量在总降雨量中所占比例作为指标确定与7种雨型的相似度来判断降雨事件属于哪种雨型。

根据统计数据来看,在中国双峰雨型和均匀雨型发生相对较少^[32,54,56-60]。并且由于单峰雨型的降雨更加集中,容易导致洪水发生,所以应重点考虑单峰雨型。通过计算机编程,运用上述模糊识别法建立模糊矩阵,将降雨过程作为输入端传输至模型中,与模糊矩阵进行对比判定,可确定本次降雨具体属于哪种雨型类别^[61]。

3 短历时设计暴雨雨型推求方法

短历时设计暴雨雨型的历时范围一般指不超过6 h,尤指2 h的降雨历时。虽然短历时降雨事件随机性很强,但也可通过数理统计方法获得地区的雨型特征值^[62]。由统计数据所掌握降雨的时程分配,来描述降雨强度随降雨历时变化的过程是可行的。在研究流域有长序列降雨资料的情况下,目前常用的几种设计雨型推求方法包括:芝加哥雨型法、Huff雨型分类法、三角形雨型法、Pilgrim & Cordery法等。由于无降雨资料流域无实测暴雨数据,所以需根据所属市、区水文手册资料和手册中的雨型资料,计算设计历时总雨型与历时中各小时段降雨比例分布,最终得到无资料地区雨型^[63-64]。根据文献大致描绘了4种常见短历时设计暴雨雨型的特征(表1),在芝加哥雨型优缺点中也给出了部分地区雨峰系数的估算(表2)。

3.1 芝加哥雨型法

芝加哥雨型法又称为Keifer & Chu法。芝加哥

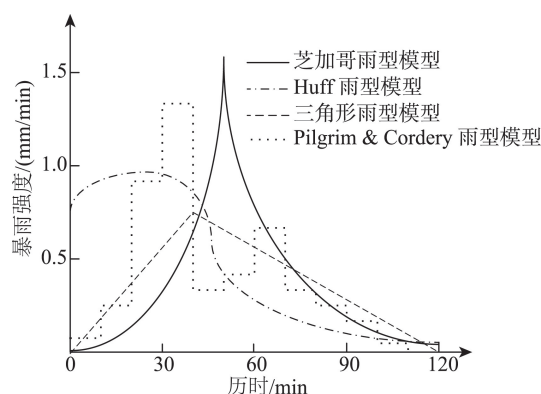


图2 4种短历时设计雨型示意图

Fig.2 Diagrammatic sketch of four short-duration hyetographs

雨型模型^[65]是通过暴雨强度公式来推求的,雨峰的位置(综合雨峰位置系数 r)通过往年暴雨事件统计资料确定,推求流程大致如下(图3):

暴雨强度公式描述暴雨平均降雨强度,然而在雨型中需要设计暴雨雨峰的极值,于是芝加哥雨型模型通过综合雨峰位置系数确定来反映雨峰的位置。所以模型推求的先决条件是需要判定综合雨峰位置系数 r 的数值。 r 值是在降雨事件过程中,降雨强度为最大值的时刻 t_i 与整个降雨历时 T_i 的比值, $0 < r < 1$ 。根据雨峰位置把整个降雨事件分为峰前与峰后2个时间段,暴雨强度计算如式(3)。

$$r_i = \frac{t_i}{T_i} \quad (1)$$

$$r = \frac{\sum_i t_i \times T_i}{\sum_i T_i} \quad (2)$$

$$i = \frac{A}{(t+b)^n} \quad (3)$$

式中: i 为设计暴雨强度; A 为时雨率; t 为时间; b 为

表1 短历时设计雨型特点总结

Tab.1 Summary of short-duration design hietographs

设计雨型名称	来源	原理或计算方法	优缺点	适用性
芝加哥雨型模型	Keifer等 ^[65] 于1957年提出	通过暴雨强度公式与雨峰系数推求雨型	只需通过降雨资料计算出综合雨峰系数 r ,在资料较少的地区也可以通过表2 ^[66] 估算 r 值,对暴雨资料依赖度较低;雨峰部分与历时无关,因此物理意义不明显,雨峰只可设计单峰雨型,且过于尖瘦	更适用于推求设计国内汇流面积相对小的城镇地区;3 h左右的设计降雨历时最为准确
Huff雨型模型	Huff ^[67] 于1967年提出	由降水过程中峰值位置决定类型,通过无量纲累积曲线法设计雨型	处理方法简单,接近实际;对暴雨数据依赖性较强,若历时选取不当,会造成较大误差	适用大多数流域,但如果流域面积过大,须重点考虑空间分布;若降雨数据不足,极短历时雨型结果不准确
三角形雨型模型	Yen等 ^[44] 于1980年提出	通过研究地区暴雨过程平均无因次一阶矩与三角形无因次一阶矩的相等条件设计雨型	推导方法简单;适用区域有限制,可能会与实际暴雨过程有偏差	主要应用于中小水库的暴雨设计
Pilgrim & Cordery雨型模型	Pilgrim等 ^[68] 于1975年提出	通过统计数据在最大可能雨峰位置设计雨峰,其余时段按雨量比例平均值设计雨型	需统计与所求雨型相同历时的样本,所以统计样本相对较少;推导较为复杂,对降雨资料依赖性较强	更适用于推求设计汇流面积中等的流域;重现期相对较小、降雨历时相对较短的设计雨型

表2 国内外综合雨峰位置系数统计

Tab.2 Statistics of comprehensive rainfall peak location coefficient

国家,地区	r	国家,地区	r
美国,芝加哥	0.375	中国,北京	0.355
苏联,远东地区	0.350	中国,上海	0.367
苏联,乌克兰地区	0.200	中国,合肥	0.414
日本,九州地区	0.500	中国,大部分地区	0.3~0.4

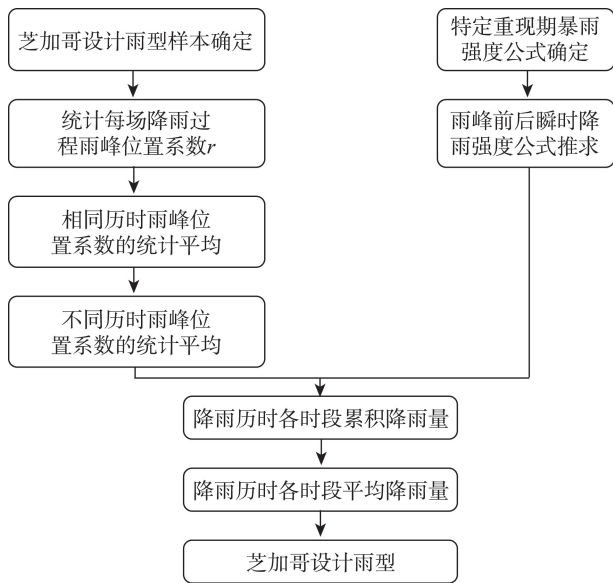


图3 芝加哥雨型模型推求流程图^[65]

Fig.3 Flow chart for deducing the Chicago Hietograph Model

时间参数; n 为暴雨衰减指数。

设总降雨历时为 t_z ,总降雨量为 H_z 。峰前峰后瞬时降雨强度分别为 I_{a1} 、 I_{a2} ;峰前峰后降雨历时分别为 t_{a1} 、 t_{a2} ;累积降雨量分别为 H_{a1} 、 H_{a2} ,可得:

$$t_{a1} = t_z \times r \quad (4)$$

$$t_{a2} = t_z \times (1 - r) \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3)得到峰前峰后平均雨强:

$$i_{a1} = \frac{r^n A}{(t + rb)^n} \quad (6)$$

$$i_{a2} = \frac{(1 - r)^n A}{[t + (1 - r)b]^n} \quad (7)$$

将式(6)、式(7)左右两边对时间 t 求导得到瞬时雨强:

$$I_{a1} = \frac{(1 - n)r^n A}{(t + rb)^n} + \frac{nbr^{n+1} A}{(t + rb)^{n+1}} \quad (8)$$

$$I_{a2} = \frac{(1 - n)(1 - r)^n A}{[t + (1 - r)b]^n} + \frac{nb(1 - r)^{n+1} A}{[t + (1 - r)b]^{n+1}} \quad (9)$$

最后将式(8)、(9)对时间 t 积分,最终得到降雨量累积过程式:

$$H_{a1} = H_z \left\{ r - \left(r - \frac{t}{t_z} \right) \left[1 - \frac{t}{r(t_z + b)} \right]^n \right\} \quad (10)$$

$$H_{a2} = H_z \left\{ r + \left(\frac{t}{t_z} - r \right) \left[1 + \frac{t - t_z}{(1 - r)(t_z + b)} \right]^n \right\} \quad (11)$$

3.2 Huff法

Huff雨型^[67]将降雨历时分为4个时段,Huff雨型是由降水过程中各个1/4时间间隔峰值雨强的位置决定的。Huff雨型的无量纲累积曲线法是描述降水过程的一种方法,可用于模拟总体分析,目前被广泛使用^[69]。Huff在美国伊利诺伊州中东部利用1955—1966年在400平方英里(1平方英里=2.59 km²)中的49个雨量计数据资料进行分析,所选取的降雨时间间隔为5 min、15 min和30 min。雨型模型建立的主要原理是:对前后均有6 h或更长时间内无雨或降雨量小于0.5英寸(1英寸=2.54 cm)之间的降雨事件进行筛选,选取降雨量超过25.4英寸的场次,共261场,降雨历时范围为3~48 h。根据暴雨雨峰在不同时间段出现时间点的不同,将雨型分为4种类型,雨峰出现在第几个1/4降雨历时的时段内,便被称为第几种类型。Huff归纳大量数据总结出当地降雨的绝大部分雨量集中在1/4的时间段内,4个1/4的时间段内暴雨雨型占总数的频率分别为30%、36%、19%、15%,可见,短历时暴雨雨峰大多出现在前2个1/4区间^[61]。

Huff雨型的推求建立过程大致如下:①按照降雨时间间隔与降雨量标准将一场降雨历时为固定时间的降雨事件划分为相对独立的降雨事件;②对每个独立的降雨事件进行统计数理分析,若该场次降雨事件的降雨量大于设定的标准值则将其确定为有效降雨事件;③分析在场次暴雨事件中最大雨强的发生时间段,根据降雨峰值在每1/4时间区段的位置,确定雨型分布为具体的Huff雨型类别;④最后通过累积降水量百分比与累积暴雨时间百分比确定使用的无量纲曲线进行设计计算。Huff之后在20世纪90年代利用分布在美国芝加哥地区的6个雨量站与在伊利诺伊州内12个雨量站的降雨数据,融合了先前的研究,比较点、面雨量的雨型差异^[70],指出了概率分布为50%的无量纲曲线与实际暴雨情况最接近。

3.3 三角形雨型法

Yen等^[44]在小流域暴雨排水设施的设计和污染物控制的问题上提出了一个原理与推求方法都相对简单的三角形雨型模型(图4)。由于降雨过程线随时间变化而变化,很难精准预测后续走势,所以设计雨型只能通过之前降雨数据的统计值在概率论中确定。基于这种理论,Yen等^[44]在1980年应用统计矩法提出了一种三角形雨型,主要原理是将各

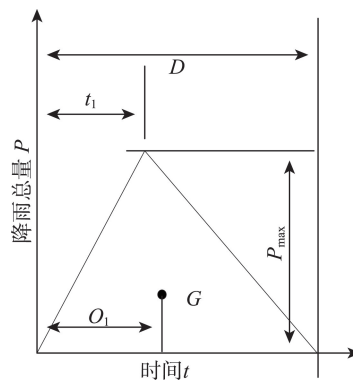


图4 三角形雨型模型示意图^[44]

Fig.4 Sketch map of the Triangular Hyetograph

阶原点矩在暴雨过程中作为雨型数字特征,利用研究地区暴雨事件样本的平均无因次一阶矩的相等条件来进行雨型设计。三角形雨型中的主要参数为雨型参数、降雨历时、时间间隔和总降雨量。Yen等通过降雨过程中典型的特征值,用三角形等对其进行概化,确定具体设计暴雨的时间分配,具体雨型推求的步骤大致如下:①根据统计的降雨事件确定降雨总量 P 、总降雨历时 D 、一阶原点矩 O_1 ,其中 O_1 代表暴雨过程线所围成面积(总降雨量 P)的重心 G 与降雨开始时间的时间间隔;②根据统计往年降雨资料确定雨型参数 K_t ;③对于所设计的三角形雨型而言, G 为其重心, D 为其底边, t_1 为其最大雨强时刻, P_{\max} 为其最大雨强;根据其所有参数通过简化的三角形可得顶点位置为:

$$t_1 = (3K_t - 1) \times D \quad (12)$$

很多学者通过研究发现, t_1 在总降雨历时长内一般占比大多为0.31~0.51,计算结果与国内外统计结果相似,证明雨型有一定的可靠性^[71]。

3.4 Pilgrim & Cordery法

Pilgrim & Cordery^[68]在1975年提出,原理是推求设计雨型时,在出现可能性最大的位置上设计暴雨雨峰。推求流程原理简单但处理复杂(图5)。

Pilgrim & Cordery雨型^[68,72-74]是一种无级序平均计算雨型。雨峰的量及时间段在设计降雨总雨量及总历时的比例,取各场筛选过的暴雨雨峰所占比例的平均值,并且其他各时段的位置和比例也用相同方法确定。具体推求雨型步骤如下:①选取特定历时暴雨的样本,一般是超过50场降雨量最大的降雨事件,场次越多、统计结果越精准越有意义。②将特定历时分为若干时段,最后结果所期望的时程分配时间步长决定了整个降雨历时被分时段

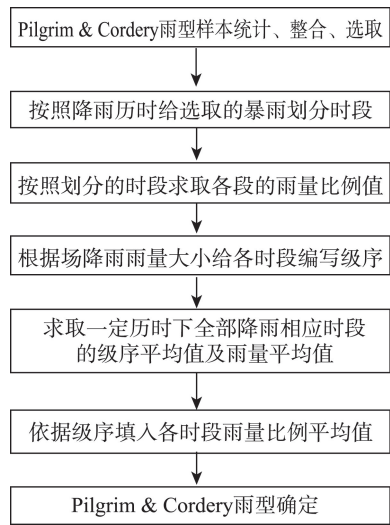


图5 Pilgrim & Cordery雨型模型推求流程图^[68]

Fig.5 Flow chart for deducing the Pilgrim & Cordery Hyetograph

长短。理论来说,所分时段越短越好,一般以5 min为标准。③计算出各场暴雨样本中各时段雨量占该场降雨总雨量的比值。④将划分好的降雨样本按照各时段雨量比例由大到小排列,进行升序编号,编号即为级序。⑤将样本按照各个历时求取暴雨样本相应的雨量之比和各时段的平均值。⑥将雨量比例按照级序排列顺序填入相应的位置,通过样本计算的结果构建Pilgrim & Cordery雨量过程线。

3.5 短历时设计暴雨雨型模型对比及应用

岑国平^[75]采用美国ILLUDAS模型基于上海黄渡站雨量资料模拟了芝加哥雨型模型、Huff雨型模型、三角形雨型模型和Pilgrim & Cordery雨型模型并与频率分析法计算误差。结果表明,通过几种雨

型推求所得到的洪峰流量差异较大。Huff雨型模型和三角形雨型模型推求的洪峰流量主要对降雨历时较为敏感,若降雨历时选择不当,则会产生较大误差;芝加哥雨型模型与Pilgrim & Cordery雨型模型对降雨历时不太敏感(表3)。

4 长历时设计暴雨雨型推求方法

4.1 SCS雨型法

长历时设计暴雨雨型的历时范围一般指超过2 h,尤指24 h的降雨历时。国外尤其美国常用的推求方法主要是SCS雨型^[84]。该雨型是美国农业部国家自然资源保护局(Natural Resources Conservation Service, NRCS)在1986年通过收集美国国家气象局(National Weather Service, NWS)6 h和24 h的暴雨资料,在美国建立了以横坐标为时间、纵坐标为雨量百分比的综合雨型曲线,涵盖了美国全境不同气候的所有地区^[85]。由于美国地形复杂多变,SCS雨型被分为第I类、第IA类、第II类和第III类,是通过美国不同地区的气候来判定的,并且主要适用于美国的小流域,尤其是城市化流域^[86]。第I类、第IA类代表太平洋海洋性气候,冬季潮湿,夏季干燥;第II类代表墨西哥湾和大西洋沿岸地区,其热带风暴会带来大量历时为24 h的降雨量;第III类代表美国的其他地区。由于中国与美国气候相差较大,所以这种雨型主要在美国应用^[84,87]。

4.2 同频率分析法

在中国主要用同频率分析法,也称“长包短”。“长包短”指长降雨历时雨型包含短降雨历时雨型。在王家祁编写的《中国暴雨》一文中,介绍了同

表3 各短历时雨型已有应用简单汇总

Tab.3 A simple summary of the existing applications of short-duration hyetographs

设计雨型名称	已有的应用
芝加哥雨型模型	《室外排水设计规范》 ^[76] 和《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》 ^[77] 中提出短历时降雨雨型确定推荐采用芝加哥雨型;邓培德 ^[78] 以芝加哥雨型概念导出三参数雨型,提出同频率控制的模式雨型;谢东等 ^[79] 运用芝加哥雨型法对柳州市短历时雨型进行了推求计算;Alfieri等 ^[13] 发现芝加哥雨型倾向于高估雨峰,但将结果乘一个恒定的比例系数则雨型会更加可靠
Huff雨型模型	Yin等 ^[80] 采用Huff雨型对中国东部和中部共18个气象站30~40 a数据得出中部和东部的Huff曲线;美国环境保护署 ^[81] 开发的暴雨管理模型SWMM将Huff雨型加入到程序中的降雨时程分布模块中;Azli等 ^[82] 通过13个站点5800次降雨事件的时降雨量数据得到Huff雨型,与之前使用的设计雨型有较大不同
三角形雨型模型	雨洪调蓄池容积计算中岑国平等 ^[59] 建议使用三角形雨型模型;Asquith等 ^[83] 通过美国得克萨斯州降雨大数据库对州内0~12 h和12~72 h建立了三角形雨型的无量纲累积曲线
Pilgrim & Cordery雨型模型	Gong等 ^[9] 利用Pilgrim & Cordery雨型在北京一校区建立SWMM模型,认为Pilgrim & Cordery雨峰在设计为前1/4最严重情况下,所得到的洪峰和污染物值是最大的;Wang等 ^[32] 运用Pilgrim & Cordery模型在上海杨浦区将暴雨分为单峰暴雨和双峰暴雨,结果更加合理;Li等 ^[69] 在对低影响开发中选择雨型作为输入模块,经过设计雨型的对比认为Pilgrim & Cordery雨型最适合雨水系统优化的研究

频率法^[88-89]。该方法原理是通过同频率控制缩放方法,收集典型雨型或综合雨型数据,采用各历时设计雨量推算设计暴雨过程;其特点是在相同给定的重现期水平下,依据出现次数的频率决定时间序位,这样保证了各历时时间的关联性,再以平均数值计算出各时段雨量的比例,最后整合为降雨过程线^[90-92]。同频率分析法推求的具体步骤为(以5 min雨型推求15 min雨型为例):①从往年暴雨数据中统计出5 min和15 min的最大降雨事件,以及5 min和15 min的时段雨量;②通过频率计算分析,根据所统计的时段雨量求得重现期下5 min和15 min的时段雨量;③将15 min的暴雨历时过程分为 t_1 、 t_2 、 t_3 三部分,统计分析最大15 min暴雨过程中的最大5 min出现频率最高的位置,计算其最大值的平均值放入所在时段;④通过多场典型暴雨数据过程的均值计算其余非频率最高的2个时段雨量,确定分配比例;⑤15 min设计雨型将5 min设计雨型根据雨峰位置对齐插入对应重现期下的降雨,得到完整15 min雨型过程线。

同频率分析法主要在国内应用,是水利部制定的水利水电工程设计洪水计算规范^[93]中推荐的设计暴雨的主要方法之一。钱王骋^[60]通过同频率法在中小流域设计雨型问题上进行了探讨;杨星等^[92]建立了雨型的风险率分析模型,结果表明同频率分析法在长历时雨型中表现较好。同频率法设计暴雨过程中需要统计各降雨历时的暴雨,通过大量降雨事件数据推导而得,所以其雨型过程线、雨峰位置和个数以及最大暴雨强度等都可准确描述大多数暴雨雨强的时程分配规律。由于同频率法对暴雨资料的依赖性很强,如果所需的降雨历时场次不足,无法获得足够的典型降雨事件样本,则所得到的雨型会不如人意。

同频率分析法可以用来推求流域面积大、降雨历时长雨型,所以对于长历时如24 h~7 d的设计

暴雨,一般采用同频率法,重现期在百年一遇内都较为适用。同频率法主要优点是受典型降雨事件影响较小,放大后的设计雨型的暴雨雨峰和时段雨量都与设计值相同,可用于雨峰和雨量几乎无关的地区;缺点是有时会改变典型雨型的形状,使其不再具有典型性。所以在使用同频率分析法时不应将时段划分过多,必须保持雨峰和各时段雨量与设计值相等(表4)。

5 结论与展望

本文总结了典型暴雨与雨型推求方法,强调了设计暴雨雨型的重要性,介绍了典型暴雨雨型样本选择的原则与方法;模糊识别法鉴定雨型的种类;短历时设计暴雨雨型推求方法,其中包括芝加哥雨型模型法、Huff雨型模型法、三角形雨型模型法和Pilgrim & Cordery雨型模型法;长历时设计暴雨雨型介绍以及推求方法,包括美国SCS雨型模型和同频率分析法。系统地总结了国内外当下使用最为广泛的中小流域短历时暴雨、长历时暴雨雨型的种类以及推求方法,对其分析方法以及特征进行了梳理。经过深入的分析总结,本文认为就中国来说,中小流域的设计暴雨雨型还应重点在以下几方面展开工作:

(1) 进行暴雨雨型推求时,应对各环节的误差进行控制。尤其是在对暴雨样本进行选择时,容易产生人为误差。认识并厘清在设计雨型时,从选择暴雨样本、确定雨型设计方法到最后的推求每一步环节误差产生的原理,充分结合数理统计与随机水文分析等方法使结果更加精确,加强每步推求雨型的联系性,从整体角度控制误差的数量级,提出更加合理的解决方法。

(2) 小流域山区降雨资料的缺失问题亟需解决。不论是在设计点、面暴雨量推求,还是暴雨选择

表4 长历时雨型特点总结
Tab.4 Summary of the characteristics of long-duration hyetographs

设计雨型名称	原理或计算方法	主要适用范围及特点
SCS雨型模型法	通过统计美国境内降雨资料,利用数理统计方法建立不同重现期的暴雨雨型	在美国境内应用十分广泛。由于有较强的经验性,所以需要使用者熟悉雨型后,选取气候等条件相似的地区,再应用到国内。主要应用于长时间降雨历时和中小流域,尤其是城市流域内。重现期跨度较大,两年一遇到百年一遇的重现期模型都可在手册中直接查到
同频率分析法	同频率缩放典型雨型或综合雨型,根据所需历时不同,设计雨量推算设计暴雨过程	主要应用于国内中小流域,但也可应用于较大流域尺度。重现期在百年一遇以内都相对较为适用,对暴雨资料依赖性较强,更适用于长历时设计雨型;但若降雨事件数据不好,则结果容易改变其典型形状

的过程,都极易造成很大的误差。有些解决方法通过计算邻近雨量站的平均值或设法通过数理统计方法插补延展,但由于气候、地形的不同,结果可能与真实数据差距较大,导致设计雨型结果不够精准,应该更加深入研究对降雨资料缺失的填补问题。

(3) 在尺度范围上,当前大多数研究主要局限于城市尺度或者中小流域尺度,界限过于模糊。有研究表明,小流域尺度上,大多数情况下设计雨型用点雨型即可,但流域面积大于 500 km² 的中尺度流域设计雨型需要考虑空间分布的问题。并且由于城市下垫面和气候变化更加复杂,在城市尺度由于问题的特殊性应与普通流域区别开来,分别进行研究。

(4) 应在全国范围内不同气候、不同地理位置、不同下垫面分布下,包括城市尺度与普通流域尺度,重新剖析,用最适宜的方法计算并总结出与当地流域降雨特征最吻合的设计暴雨雨型地图集,为市政城建部门、水利工程部门等提供足够的数据及技术支持。

参考文献(References)

- [1] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. *Science*, 2005, 308: 405-408.
- [2] Shiklomanov A I, Lammers R B, Rawlins M A, et al. Temporal and spatial variations in maximum river discharge from a new Russian data set [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 112(G4): 575-579.
- [3] Reich B M. Short-duration rainfall-intensity estimates and other design aids for regions of sparse data [J]. *Journal of Hydrology*, 1963, 1(1): 3-28.
- [4] 周红莲. 由暴雨途径推求设计洪水的几点认识 [J]. *水利水电技术*, 1998(7): 52-55. [Zhou Honglian. Several understandings on estimating design flood from rainstorm path. *Water Sciences and Engineering Technology*, 1998 (7): 52-55.]
- [5] Al-Rawas G A, Valeo C. Characteristics of rainstorm temporal distributions in arid mountainous and coastal regions [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(1-2): 318-326.
- [6] Lee K T, Ho J Y. Design hyetograph for typhoon rainstorms in Taiwan [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2008, 13(7): 647-651.
- [7] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律 [J]. *地理学报*, 1983, 50(4): 416-425. [Zhang Hanxiong. The characteristics of hard rain and its distribution over the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 1983, 50(4): 416-425.]
- [8] Watt E, Marsalek J. Critical review of the evolution of the design storm event concept [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2013, 40(2): 105-113.
- [9] Gong Y, Liang X, Li X, et al. Influence of rainfall characteristics on total suspended solids in urban runoff: A case study in Beijing, China [J]. *Water*, 2016, 8(7): 278. doi: 10.3390/w8070278.
- [10] Koutsoyiannis D. A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 156(1): 193-225.
- [11] Koutsoyiannis D, Foufoula-Georgiou E. A scaling model of a storm hyetograph [J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(7): 2345-2361.
- [12] Markus M, Angel J R, Yang L, et al. Changing estimates of design precipitation in Northeastern Illinois: Comparison between different sources and sensitivity analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 347(1-2): 211-222.
- [13] Alfieri L, Laio F, Claps P. A simulation experiment for optimal design hyetograph selection [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(6): 813-820.
- [14] 初亚奇, 曾坚, 石羽, 等. 基于暴雨径流管理模型的海绵城市景观格局优化模拟 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4089-4096. [Chu Yaqi, Zeng Jian, Shi Yu, et al. Simulation of sponge city landscape pattern optimization based on the storm water management model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4089-4096.]
- [15] Goswami P, Srividya. A novel neural network design for long range prediction of rainfall pattern [J]. *Current Science*, 1996, 70(6): 447-457.
- [16] 朱秀迪, 张强, 孙鹏. 北京市快速城市化对短时间尺度降水时空特征影响及成因 [J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2086-2104. [Zhu Xiudi, Zhang Qiang, Sun Peng. Effects of urbanization on spatio-temporal distribution of precipitations in Beijing and its related. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2086-2104.]
- [17] 张建平, 朱友聪, 朱骊. 暴雨衰减指数在中小流域雨型设计中的运用探讨 [J]. *中国农村水利水电*, 2013(7): 75-77, 80. [Zhang Jianping, Zhu Youcong, Zhu Li. A probe into the application of rainstorm attenuation index in rainfall pattern design of medium and small basins. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(7): 75-77, 80.]
- [18] Yeh H C, Chen Y C, Wei C. A new approach to selecting a regionalized design hyetograph by principal component analysis and analytic hierarchy process [J]. *Paddy Water Environment*, 2013, 11(1-4): 73-85.
- [19] Grimaldi S, Serinaldi F. Design hyetograph analysis with 3- copula function [J]. *Hydrological Sciences Journal*,

- 2006, 51(2): 223-238.
- [20] Liu C, Zhou Y, Sui J, et al. Multivariate frequency analysis of urban rainfall characteristics using three-dimensional copulas [J]. *Water Science and Technology*, 2018, 2017(1): 206-218.
- [21] Cowpertwait P, Isham V, Onof C. Point process models of rainfall: Developments for fine-scale structure [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 463: 2569-2587.
- [22] Müller H, Haberlandt U. Temporal rainfall disaggregation using a multiplicative cascade model for spatial application in urban hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 847-864.
- [23] 周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于GIS的洪水灾害风险区划研究 [J]. *地理学报*, 2000, 67(1): 15-24. [Zhou Chenghu, Wan Qing, Huang Shifeng, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 67(1): 15-24.]
- [24] 刘昌明, 白鹏, 巩同梁, 等. 西藏稀缺资料地区洪峰流量推求 [J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(1): 1-6. [Liu Changming, Bai Peng, Gong Tongliang, et al. Estimation of peak flow of an ungauged basin in Tibetan Plateau. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(1): 1-6.]
- [25] Urbanas B. Reliability of design storms in modeling [C]// Huffsey R R. *Proceedings of the international symposium on urban storm runoff*. Lexington, USA: University of Kentucky, 1979: 23-26.
- [26] Packman J C, Kidd C H R. A logical approach to the design storm concept [J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(6): 994-1000.
- [27] Cheng K S, Hueter I, Hsu E C, et al. A scale-invariant Gruss-Markov model for design storm hyetographs [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(3): 723-735.
- [28] Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. *Weather and Forecasting*, 1996, 11(4): 560-581.
- [29] 李大龙, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. 中国城市LID技术设施的成本效益区域差异 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(11): 1402-1412. [Li Dalong, Jia Shaofeng, Lv Aifeng, et al. Regional difference of cost effectiveness of low impact development (LID) technical facilities in Chinese cities. *Progress in Geography*, 2017, 36(11): 1402-1412.]
- [30] Burian S J, Shepherd J M. Effect of urbanization on the diurnal rainfall pattern in Houston [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(5): 1089-1103.
- [31] Fontanazza C M, Freni G, La Loggia G, et al. Uncertainty evaluation of design rainfall for urban flood risk analysis [J]. *Water Science & Technology*, 2011, 63(11): 2641-2650.
- [32] Wang A, Qu N, Chen Y, et al. A 60-minute design rainstorm for the urban area of Yangpu District, Shanghai, China [J]. *Water*, 2018, 10(3): 312. doi: 10.3390/w10030312.
- [33] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究 [J]. *环境科学*, 2008, 29(3): 607-612. [Dong Xin, Du Pengfei, Li Zhiyi, et al. Hydrology and pollution characteristics of urban runoff: Beijing as a sample. *Environmental Science*, 2008, 29(3): 607-612.]
- [34] 夏军, 左其亨. 我国水资源学术交流十年总结与展望 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(9): 1488-1497. [Xia Jun, Zuo Qiting. China's decade summary and prospect of water resources academic exchange. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(9): 1488-1497.]
- [35] 张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1370-1379. [Zhang Liping, Du Hong, Xia Jun, et al. Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change. *Progress in Geography*, 2011, 30(11): 1370-1379.]
- [36] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 279-286. [Yang Tao, Lu Guihua, Li Huihui, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 279-286.]
- [37] 褚健婷, 夏军, 许崇育, 等. 海河流域气象和水文降水资料对比分析及时空变异 [J]. *地理学报*, 2009, 64(9): 1083-1092. [Chu Jianting, Xia Jun, Xu Chongyu, et al. Comparison and spatial-temporal variability of daily precipitation data of weather stations and rain gauges in Haihe River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(9): 1083-1092.]
- [38] Watt W E, Chow K C A, Hogg W D, et al. A 1-h urban design storm for Canada [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1986, 13(3): 293-300.
- [39] Li M, Xia J, Meng D J. Long-term trend analysis of seasonal precipitation for Beijing, China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 64-72.
- [40] Tung Y, Wong C. Assessment of design rainfall uncertainty for hydrologic engineering applications in Hong Kong [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28(3): 583-592.
- [41] 董哲仁. 试论生态水利工程的基本设计原则 [J]. *水利学报*, 2004, 35(10): 1-6. [Dong Zheren. On the design principles of eco-hydraulic engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(10): 1-6.]

- [42] Liu J G, Zang C F, Tian S Y et al. Water conservancy projects in China: Achievements, challenges and way forward [J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(3): 633-643.
- [43] 王文川, 邱林, 徐冬梅, 等. 工程水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. [Wang Wenchuan, Qiu Lin, Xu Dongmei, et al. *Engineering hydrology*. Beijing, China: China Water & Power Press, 2013.]
- [44] Yen B C, Chow V T. Design hyetographs for small drainage structures [J]. *Journal of Hydraulics Division*, 1980, 106: 1055-1076.
- [45] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. [Zhan Daojiang, Ye Shouze. *Engineering Hydrology*. Beijing, China: China Water & Power Press, 2000.]
- [46] Arnaud P, Bouvier C, Cisneros L, et al. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 260(1): 216-230.
- [47] Main W M, Levy B, McCuen R. Assessment of storm duration for hydrologic design [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2001, 6(6): 209-213.
- [48] 周惠成, 董四辉, 邓成林, 等. 基于随机水文过程的防洪调度风险分析 [J]. *水利学报*, 2006, 37(2): 227-232. [Zhou Huicheng, Dong Sihui, Deng Chenglin, et al. Risk analysis on flood control operation of reservoir based on stochastic hydrological process. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(2): 227-232.]
- [49] 关铁生, 王家祁. 20世纪暴雨和洪水极值的年代际变化 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(1): 89-94. [Guan Tiesheng, Wang Jiaqi. Inter-decadal change of the rainstorm and flood extreme values in the 20th century. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 89-94.]
- [50] Lin G F, Wu M C. A SOM-based approach to estimating design hyetographs of ungauged sites [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 339(3): 216-226.
- [51] Lin G F, Chen L H, Kao S C. Development of regional design hyetographs [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(4): 937-946.
- [52] Grimaldi S, Petroselli A, Serinaldi F. Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: Continuous simulation method versus event-based approach [J]. *Hydrological Process*, 2012, 26(20): 3124-3134.
- [53] 严明良, 王猛, 于波, 等. 基于模糊聚类分型的数值产品暴雨预报释用方法 [J]. *气象科学*, 2008, 28(5): 5581-5585. [Yan Mingliang, Wang Meng, Yu Bo, et al. A heavy rainfall forecast method based on fuzzy cluster typing by using application and interpretation of NWP. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2008, 28(5): 5581-5585.]
- [54] 王彬雁, 赵琳娜, 巩远发, 等. 北京降雨过程分型特征及短历时降雨重现期研究 [J]. *暴雨灾害*, 2015, 34(4): 302-308. [Wang Binyan, Zhao Linna, Gong Yuanfa, et al. Characteristics of temporal pattern and return period of short-duration rainfall at Beijing Observatory. *Torrential Rain and Disasters*, 2015, 34(4): 302-308.]
- [55] 张晓婧. 北京市暴雨特性及对设计暴雨时程的影响分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015. [Zhang Xiaojing. The features of summer precipitation and the influence of design storm in Beijing Area. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015.]
- [56] 王光明, 廖玉芳, 曾向红, 等. 湖南短历时暴雨雨型分析 [J]. *暴雨灾害*, 2017, 36(1): 86-90. [Wang Guangming, Liao Yufang, Zeng Xianghong, et al. The analysis of the short-duration rainstorm pattern over Hunan Province. *Torrential Rain and Disasters*, 2017, 36(1): 86-90.]
- [57] 庄智福, 王珂清, 杨杰, 等. 镇江市新一代暴雨强度公式研制及雨型设计 [J]. *气象科学*, 2015, 35(4): 506-513. [Zhuang Zhifu, Wang Keqing, Yang Jie, et al. Research on new generation rainstorm intensity formula and design of rainfall hyetograph in Zhenjiang. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2015, 35(4): 506-513.]
- [58] Zhai X Y, Guo L, Liu R H, et al. Rainfall threshold determination for flash flood warning in mountainous catchments with consideration of antecedent soil moisture and rainfall pattern [J]. *Natural Hazards*, 2018, 94(2): 605-625.
- [59] 岑国平, 沈晋, 范荣生. 城市设计暴雨雨型研究 [J]. *水科学进展*, 1998, 9(1): 42-47. [Cen Guoping, Shen Jin, Fan Rongsheng. Study on rainstorm patterns in urban design. *Advances in Water Science*, 1998, 9(1): 42-47.]
- [60] 钱王骋. 中小流域设计雨型问题的探讨 [J]. *广东水电科技*, 1987(2): 18-24. [Qian Wangcheng. Discussion on design rainfall patterns in small and medium watershed. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 1987(2): 18-24.]
- [61] 陈秀洪, 刘丙军, 陈刚. 城市化建设对降水特征的影响 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1591-1601. [Chen Xiuhong, Liu Bingjun, Chen Gang. Effects of urbanization on precipitation characteristics. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1591-1601.]
- [62] Over T M, Gupta V K. Statistical analysis of mesoscale rainfall: Dependence of a random cascade generator on large-scale forcing [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(12): 1526-1542.
- [63] 程尊兰, 朱平一, 刘雷激. 金沙江下游地区水文特征 [J]. *山地研究*, 1997, 15(3): 201-204. [Cheng Zunlan, Zhu Pingyi, Liu Leiji. Hydrological characteristics in the

- lower reach area Jinsha River. Mountain Research, 1997, 15(3): 201-204.]
- [64] Kimura N, Tai A, Chiang S, et al. Hydrological flood simulation using a design hyetograph created from extreme weather data of a high-resolution atmospheric general circulation mode [J]. Water, 2014, 6(2): 345-366.
- [65] Keifer C J, Chu H H. Synthetic storm pattern for drainage design [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1957, 83(4): 1-25.
- [66] Preul H C, Papadakis C N. Development of design storm hyetographs for Cincinnati, Ohio [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1973, 9(2): 291-300.
- [67] Huff F A. Time distribution of rainfall in heavy storms [J]. Water Resources Research, 1967, 3(4): 1007-1019.
- [68] Pilgrim D H, Cordery I. Rainfall temporal patterns for design floods [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1975, 101(1): 81-95.
- [69] Li J K, Deng C N, Li H E, et al. Hydrological environmental responses of LID and approach for rainfall pattern selection in precipitation data-lacked region [J]. Water Resources Management, 2018, 32(10): 3271-3284.
- [70] Huff F A, Angel J R. Frequency distributions of heavy rainstorms in Illinois [M]. Illinois State Water Survey, Circular 172. Champaign, USA: Department of Energy and Natural Resources, State of Illinois, 1989.
- [71] 李俊, 吴珊, 赵昕, 等. 雨型选择对LID措施效果影响的分析探讨 [J]. 给水排水, 2018, 54(5): 21-27. [Li Jun, Wu Shan, Zhao Xin, et al. Analysis on the effect of rain type selection on LID measures. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(5): 21-27.]
- [72] Cunnane C. Methods and merits of regional flood frequency analysis [J]. Journal of Hydrology, 1988, 100(1): 269-290.
- [73] Omernik J M. Ecoregions of the conterminous United States [J]. Annals of the Association of American Geographers, 1987, 77(1): 118-125.
- [74] Adams B J, Fraser H G, Howard C D D, et al. Meteorological data analysis for drainage system design [J]. Journal of Environmental Engineering, 1986, 112(5): 827-848.
- [75] 岑国平. 暴雨资料的选样与统计方法 [J]. 给水排水, 1999(4): 4-7. [Cen Guoping. Sampling and statistical method of rainstorm data. Water & Wastewater Engineering, 1999(4): 4-7.]
- [76] 上海市市政工程设计研究总院. 室外排水设计规范 [S]. 上海, 2014. [Shanghai Municipal Engineering Design Institute. Code for design of outdoor wastewater engineering. Shanghai, China, 2014.]
- [77] 住房和城乡建设部, 中国气象局. 城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则 [S]. 北京, 2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development, China Meteorological Administration. Technical guidelines for establishment of intensity- duration- frequency curve and design rainstorm profile. Beijing, China, 2014.]
- [78] 邓培德. 论城市雨水道设计中数学模型法的应用 [J]. 给水排水, 2015, 51(1): 108-112. [Deng Peide. Application of mathematical model method in urban rainway design. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(1): 108-112.]
- [79] 谢东, 苏小玲, 刘蕾, 等. 基于芝加哥法的柳州市设计暴雨雨型研究 [J]. 气象研究与应用, 2018, 39(3): 72-75. [Xie Dong, Su Xiaoling, Liu Lei, et al. Study on rainstorm type design of Liuzhou based on Chicago Method. Journal of Meteorological Research and Application, 2018, 39(3): 72-75.]
- [80] Yin S Q, Xie Y, Nearing M A, et al. Intra-storm temporal patterns of rainfall in China using Huff Curves [J]. Transactions of the ASAE, 2016, 59(6): 1619-1632.
- [81] Huber W C, Singh V P. Storm water management Model-SWMM [M]. Washington D C, USA: Environmental Protection Agency, 1975.
- [82] Azli M, Rao A R. Development of Huff curves for Peninsular Malaysia [J]. Journal of Hydrology, 2010, 388(1): 77-84.
- [83] Asquith W H, Bumgarner J R, Fahlquist L S. A triangular model of dimensionless runoff producing rainfall hyetographs in Texas [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(4): 911-921.
- [84] Cronshey R. Urban hydrology for small watersheds: TR-55 [M]. Washington D C, USA: Natural Resources Conservation Service, 1986.
- [85] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市设计暴雨研究综述 [J]. 科学通报, 2017, 62(33): 3873-3884. [Mei Chao, Liu Jiahong, Wang Hao, et al. Review on urban design rainstorm. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(33): 3873-3884.]
- [86] Abdulrazzak M, Elfeki A, Kamis A S, et al. The impact of rainfall distribution patterns on hydrological and hydraulic response in arid regions: Case study Medina, Saudi Arabia [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(21): 679. doi: 10.1007/s12517-018-4043-z.
- [87] 胡明思, 王家祁. 中国设计暴雨的综合研究 [J]. 水文, 1990(3): 1-7. [Hu Mingsi, Wang Jiaqi. A comprehensive study of designed rainstorms in China. Journal of China Hydrology, 1990(3): 1-7.]
- [88] 王家祁. 中国设计暴雨和暴雨特性的研究 [J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 328-336. [Wang Jiaqi. Studies on design storm and rainstorm characteristics in China. Ad-

- vances in Water Science, 1999, 10(3): 328-336.]
- [89] 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. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 20-26.]
- [90] 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, 42. [Yang Xing, Li Zhiqing, Li Zhaofang, et al. Safety margin for design hyetograph calculated by same-frequency amplification method. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 19-23, 42.]
- [91] 郭生练, 刘章君, 熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价 [J]. 水利学报, 2016, 47(3): 302-314. [Guo Shenglian, Liu Zhangjun, Xiong Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 302-314.]
- [92] 杨星, 朱大栋, 李朝方, 等. 按风险率模型分析的设计雨型 [J]. 水利学报, 2013, 44(5): 542-548. [Yang Xing, Zhu Dadong, Li Zhaofang, et al. Establishment of design hyetographs based on risk probability models. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 542-548.]
- [93] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范(SL44—2006) [S]. 北京, 2006. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects (SL44—2006). Beijing, China, 2006.]

Research progress on design hyetographs in small and medium-scale basins

YAN Zhengxiao^{1,2,4}, XIA Jun^{1,3,4*}, SONG Jinxi^{1,4}, ZHAO Lingling², PANG Guowei¹

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China;

3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

4. Key Laboratory of Surface System and Environmental Carrying Capacity, Shaanxi Province, Xi'an 710127, China)

Abstract: Designing hyetographs is the basis of deducing design flood for small and medium-sized watersheds lacking flow data. It has a significant impact on construction standards of water conservancy facilities and municipal engineering design. Therefore, a large number of studies on design hyetograph has been carried out in China and internationally. In recent years, due to the impact of climate and environmental changes, great floods occur frequently. Mountain floods and waterlogging in urban areas pose a threat to the property and personal safety of mountain people and urban residents, and have caused many disasters. Therefore, higher requirements are put forward for the design of hyetographs. This article systematically summarized the principles and methods for selecting typical hyetographs and the classification of hyetographs, and reviewed the methods of deducing hyetographs in China and abroad, including the Chicago Hyetographs, the Huff Hyetographs, the Triangle Rainfall Hyetographs, and the Pilgrim & Cordery (P&C) Hyetographs—our short-duration design hyetographs in total, as well as the long-duration Soil Conservation Service (SCS) Hyetographs and the same-frequency method. Finally, the problems in designing hyetographs in small and medium-sized watersheds and the prospects for future research are put forward.

Keywords: design hyetograph; temporal distribution; deducing short-duration and long-duration hyetographs; medium and small-sized watersheds