

小流域暴雨洪水计算

陈家琦 张恭肃 著

水利电力出版社



小流域暴雨洪水计算

张 明 著

水利部成都山地所

小流域暴雨洪水计算

陈家琦 张恭肃 著

水利电力出版社

小流域暴雨洪水计算

陈家琦 张恭肃 著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 7.625印张 199千字
1985年4月第一版 1985年4月北京第一次印刷

印数0001—4920册 定价2.60元

书号 15143·5639

内 容 提 要

本书论述现行常见以推理公式和瞬时单位线为基础的小流域暴雨洪水计算问题。结合我国暴雨洪水特点，书中建议了水科院推理公式法和变雨强单位线法，并提出了根据暴雨洪水对应观测资料分析公式中参数定量关系的方法和计算程序、实例。

本书可供从事水文计算的科研、设计、工程管理人员阅读，亦可供有关院校师生参考。

3636/07

前 言

在我国第一个五年计划期间，在农业合作化的推动下，全国掀起兴修中小型水利工程的高潮。为配合生产建设的需要，原水利部北京水利科学研究所水文研究所从1956年开始了小流域暴雨洪水的研究，并在1958年正式出版了《水利科学研究所研究报告（7）：小汇水面积雨洪最大径流计算图解分析法》，即水科院推理公式法。这项工作的参加者有陈家琦、滕炜芬、程铁英、董秀玲、宁祥葆、温灼如、王平章、潘之棣、赵桂云等。这个公式在部分省水利部门得到应用，并在使用过程中积累不少经验。1961年水利水电科学研究所水文研究所和广东省水利电力厅水文总站协作，进一步改进了方法，并提出利用暴雨和洪水对应实测资料分析推理公式中产汇流参数的概念和方法，引起了各方面的兴趣，并在更多地区应用。在研究过程中广东省徐启麟、赵广荣等参加了协作。1966年5月正式出版《小流域暴雨洪水计算问题》一书，系统地叙述了推理公式法的发展及水科院推理公式的理论、方法、参数定量分析、设计洪水过程线等。参加这项工作的有陈家琦、滕炜芬、阚贵生、张恭肃、顾文燕、骆承政、孙济良等。

从1973年开始修订的水利水电工程设计洪水计算规范，已于1980年正式颁布试行。其中附录五“小流域设计洪水”中以水科院推理公式为主要内容。参加编写的有陈家琦、滕炜芬等。

近年来全国协作进行的暴雨径流查算图表编制工作中，不少地区对水科院推理公式参数分析做了大量工作，1981年起水利水电科学研究所水资源所和浙江省水利水电勘测设计院、山东省水利学校协作，对推理公式应用于特小流域的问题进行研究，并提出了成果。参加这项工作的有张恭肃、周森林、钮泽宸、周天麟等。

从60年代初期瞬时单位线法引入我国，曾用于站网分析、水文预报及设计洪水等方面，1977年在进行设计洪水计算和洪水预报工作中，结合我国暴雨洪水特点的分析，应用近几年发生的特大洪水资料，提出考虑非线性变化的瞬时单位线法，并利用计算机对参数进行优选。在暴雨径流查算图表工作中，也有不少地区进行了分析。参加该项工作的有张恭肃、黄守信、贺伟程、庾维德等。

为适应生产实践的需要，决定在以往工作的基础上，对水科院推理公式法及变动参数瞬时单位线法（即变雨强单位线法）进行整理，汇成一册，以便于应用。其中推理公式部分，采用了1966年出版的《小流域暴雨洪水计算问题》中的部分内容，并进行了一些补充修改，因此本书也包括了原书所有作者的不少心血，特此致谢。

著 者

1983年8月

目 录

前 言

第一章 以推理公式为基础的小流域暴雨洪水计算方法	1
第一节 推理公式法的发展及其综述	1
一、引言	1
二、推理公式法的发展及其综述	2
三、推理公式法的展望	25
第二节 推理公式的理论基础	27
第三节 计算方法	38
一、最大流量的计算	38
二、时段洪量及洪水过程线	53
三、计算举例	59
四、结语	70
第四节 参数的定量与综合	71
一、参数分析的基本思路	72
二、汇流参数 m 的定量和综合方法	74
三、特小流域参数综合的特点	90
四、计算举例	92
第二章 以瞬时单位线为基础的小流域暴雨洪水计算方法	
第一节 近代汇流理论中的几个基本概念	108
一、引言	108
二、系统的概念	109
三、系统的响应函数	111
四、系统的滞时	112
第二节 流域瞬时单位线的发展概述	112
第三节 以纳希瞬时单位线为模式的变雨强单位线法	118
一、流域汇流的卷积公式	118
二、纳希瞬时单位线模式——流域汇流概念性模式	122

三、计算方法	124
四、结语	143
第四节 参数的综合分析	146
一、单站参数的综合——雨强对单位线的影响	147
二、地区(多站)综合	152
三、综合成果的检验	158
四、计算举例	161
第五节 单位线的非线性分析	184
一、问题的提出	184
二、研究途径	185
三、主要研究成果介绍	189
参考文献	199
附录I 计算源程序	203
附录II Ψ 、 τ 诺模图	235

第一章 以推理公式为基础的小流域 暴雨洪水计算方法

第一节 推理公式法的发展及其综述

一、引言

推理公式法，或称“合理化”法，是最早用作根据暴雨资料间接推求设计洪水最大流量的方法之一，至今已有一百多年历史。推理公式是在什么时候由何人提出，并从什么时候在生产上开始应用，尚难确切考证清楚，许多国家均有其各自认为可靠的资料来说明推理公式的历史。各国随城市建设、交通建设和农田排水工程的开展，对推理公式的发展和应用等方面，进行了不少的工作，并积累了很多经验。

我国何时正式采用推理公式，确切年代亦难以查考，但可以说解放前在我国实际应用的经验很少。在全国解放后随社会主义建设事业的发展，在铁道、公路、城市和工业区防洪排洪、市区排水以及中小型水利建设等方面，都曾使用推理公式法计算设计洪水。水利水电、铁道、公路、市政的科研设计部门以及有关高等院校，都分别对推理公式法进行了大量和系统的研究工作。1956年水利科学研究院水文研究所林平一提出以推理公式为基础的计算最大流量的方法^[1]。1958年水利科学研究院提出了以推理公式为基础的计算小汇水面积雨洪最大径流的图解分析法。自1958年以来，随中小型水利建设的大规模开展，各地在应用推理公式方面都取得并创造了不少有用的经验，特别是继1962年以后又提出从实测资料反求推理公式中的参数，进一步丰富了推理公式的内容，使推理公式在我国的研究与应用水平，提高了一大步^[2]。

推理公式在其一百多年以来的实践的考验中，不断发展前进，

在一个时期曾是由暴雨推算洪水的主要依据。以后发展起来的时面汇流曲线法、等流时线法及单位线法等，对洪水形成过程中不同环节所采用的概化条件进行了改进，并同时扩充了解答任务的范围，即不止限于计算流域出口断面处的最大流量，而同时解决洪水过程线的问题。但推理公式法由于计算程序简便，对资料条件要求不高，至今仍然是小流域（天然的和人工的）计算暴雨洪水的主要方法之一。

推理公式在其发展过程中，形成了许多由基本形式派生的不同形式，并形成了不同的理论。在形式上的不同，主要由于在推理公式中包括的暴雨长短历时强度公式、汇流速度公式和考虑损失的方法有所不同；而在理论方面，则有从成因或从经验的途径来解答产流、汇流各个环节中提出的问题，以及在什么条件下产生最大流量值等等问题。

本节将对一百多年来推理公式在不同环节上的发展进行简要综述，以供在研究和应用推理公式时参考。

二、推理公式法的发展及其综述

（一）古典的推理公式

在1851年摩尔凡尼（T.J.Mulvaney）给出的推理公式基本形式，在一个时期内成为推理公式的唯一形式，即

$$Q = \Psi a F, \quad (1-1)$$

式中 Q 为最大流量； Ψ 为径流系数； a 为降雨强度； F 为流域面积。

这种形式的建立是从最简单朴素的成因概念出发，认为在流域出口断面处形成的最大流量，是降在流域上的暴雨经过产流和汇流两个阶段的结果；降雨和产流无论在流域的面分布和在时程上的分配，在计算时段内都假定为均匀不变，而对流域中的汇流，则是不分河道坡面，一律等速传播，也没有考虑任何调蓄作用。

最初的推理公式对设计暴雨的要求，就是在时程上降雨强度不变，并在时间上可以不受限制地持续这种强度，扣损时也认为径

流与降雨保持不变的折扣关系，即径流系数为常数。在这种情况下流域汇流时间实际是不起作用的因素，因而在计算公式中不包含汇流时间。在当时通用的方法中，有的采用已经观测到的某一次大暴雨的平均强度直接代入公式计算，并不管这次暴雨的实际降雨历时与流域大小是否适应。例如1847年在爱尔兰农田排水工程设计时采用的最大日暴雨量为1.5~2.0英寸(38~51毫米/日)；而在奥地利凯斯特林的公式中曾移用发生在巴黎的一次10分钟降雨9.6毫米的记录，即代入公式的降雨强度为0.96毫米/分钟；在使用中并不考虑流域汇流时间是否小于1日或大于10分钟。

径流系数往往根据个别实测资料中一次降雨总量与所形成的径流总量的比例。由于对降雨产流采用了均匀概化的结果，在实际中常参考流域地表特征和流域面积大小，给出径流系数表。在凯斯特林方法中，径流系数按考虑损失和考虑流域大小的两个系数相乘得到，并采用考虑损失的径流系数一律为0.5，考虑流域大小的则随河沟长度大小而为1~1/8。俄国的尼古拉依(Л.Ф.Николаи)在凯斯特林公式的基础上，除了考虑河沟长度的作用，又考虑了不同流域比降的影响，即在进一步修正了凯斯特林的径流系数 α 的基础上，又增加一个系数 β ，并假定凯斯特林的径流系数 α 基本上代表流域比降接近0.008的情况，即在此时 $\beta=1.0$ ，而当流域比降由0.001变化至0.05时， β 由3/16变化至1.50。凯斯特林和尼古拉依方法，径流系数的确定主要是从推理的概念出发，还没有考虑流域的地表特征。美国的雷木塞(C. E. Ramser)在1927年发表的推理公式，则将径流系数考虑为与流域情况及流域比降有关的经验参数。

在古典的推理公式中，一般只包含径流系数、降雨强度和流域面积三个因素，代表在理想条件下由暴雨形成最大流量的推理关系。在这种条件下，如果降雨的历时持续较长，超过了流域汇流时间，就认为可以产生梯形的洪水过程线。这些假定的条件和概化的关系，自然不能满足实用的要求。因此在实践中的推理公式，就逐步改进各个环节的概化关系，采用和地区暴雨洪水特性相结

合的方法，不断提高其实用性。

(二) 设计暴雨在推理公式法中的发展综述

在推理公式的实用过程中最早为人注意的问题之一，就是暴雨的平均强度随历时而变化。摩尔凡尼在1851年曾提出不变强度的设计暴雨是不存在的，并提出对于不同大小的流域来讲不应采用同一的暴雨强度进行计算。但当时限于能记载暴雨过程的工具尚未普遍，资料极少，因而摩尔凡尼未能提出具体的改进方法。只是在以后的实践中，随各地暴雨记录的不断提高，对采用的设计值进行了相应的改变。在雨量资料特别是自记雨量记录有相当积累以后，逐渐建立了各种形式的暴雨平均强度随历时的增长而递减的经验公式，并开始将暴雨公式与推理公式联系起来。

暴雨公式形式很多。最常见的暴雨公式是包括单位时间最大降雨量 S 和降雨历时 t 的双曲线幂函数公式，即

$$a = \frac{S}{t^n}, \quad (1-2)$$

或

$$a = \frac{S}{t+d}, \quad (1-3)$$

或

$$a = \frac{S}{(t+d)^n}, \quad (1-4)$$

式中 a 为历时 t 的最大平均降雨强度， n 或 d 均为经验系数，根据地区的暴雨资料而定。这种公式以数学方程经验地配合实测资料点据，并无推理成因关系。有的公式除在分母项中有系数 d 的加减以外，历时 t 或整个分母也带有经验的方次。

在1950年苏联阿列克谢也夫(Г.А.Алексеев)提出指数函数方程表达的暴雨公式^[3]，并用以反映一次暴雨过程中的长短历时暴雨量的关系，其中除包括单位时间最大降雨强度(或称瞬时最大降雨强度)及降雨历时外，还考虑了一次降雨深。公式的形式是

$$I_t = I_0 e^{-(I_0/H)t}, \quad (1-5)$$

式中 I_t 为历时 t 的一段最大降雨起始与终了的瞬时降雨强度， I_0 为瞬时最大降雨强度， H 为一次降雨量， t 为降雨历时（图 1-1）。由此，在 t 时段内的最大降雨量为

$$H_t = \int_0^t I_t dt = H (1 - e^{-(I_0/H)t}) \quad (1-6)$$

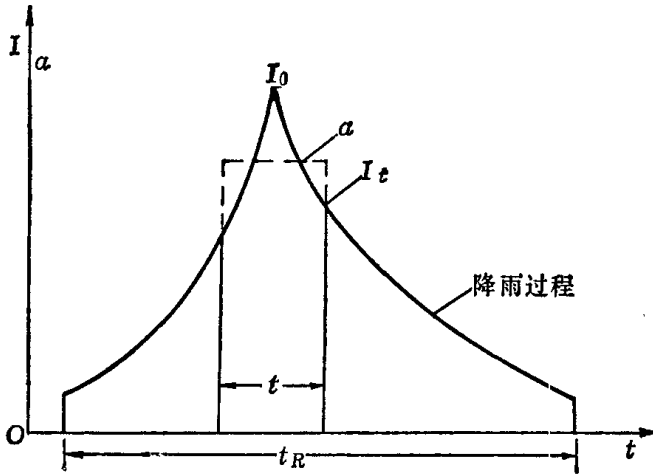


图 1-1 阿列克谢也夫概化雨型

因此，在历时 t 内最大平均降雨强度为

$$a = \frac{H_t}{t} = \frac{H}{t} (1 - e^{-(I_0/H)t}) \quad (1-7)$$

1953年阿列克谢也夫将最大降雨平均强度公式改为内插公式的形式，即

$$a = \frac{I_0}{1 + \frac{I_0}{H}t} \quad (1-8)$$

重要的不在于形式，幂函数方程与指数函数方程均近似地反映暴雨强度随历时增大的递减律。如果用双对数坐标纸点绘 a 与 t 的关系，适为直线的结果就得幂方程；如果用半对数坐标纸，就得指数方程。但阿列克谢也夫所指出的以暴雨公式来反映暴雨过程中的内在联系，而不是将不同历时的降雨作为孤零零一场场雨

看待，是结合推理公式研究暴雨的一个重要发展。在这以前，暴雨公式只反映各次雨间的关系，有了描绘暴雨过程的公式，就可以使研究洪水过程有所依据，并将推理公式法和等流时线法结合起来，从而建立起一整套以推理公式为基础的洪水形成理论。过去，人们对推理公式法确定的最大流量，常认为是降雨（或产流）历时恰好与流域汇流时相等（不多也不少）的一次降雨所造成。当引入暴雨过程的概念以后，则最大流量在多数情况下是一次降雨过程中强度最大、且持续时间与流域汇流时间相等的那一部分降雨所造成的，在这段降雨的前后，还有强度较小的降雨。阿列克谢也夫用暴雨公式来描绘一次单峰降雨的内在关系，从而导出了产流历时的计算方法，使推理公式需要考虑流域汇流时间大于或小于产流历时的情况。对这些问题在下面还要谈到。

有的推理公式需要建立暴雨的标准过程线。例如苏联包尔达可夫（Е.В.Болдаков）和切戈达也夫（Н.Н.Чегодаев）在1951~1953年提出的方法。他们建议用地区上实测的暴雨累积过程换算成雨量和时间的相对坐标，然后重迭求平均过程，当做降雨标准过程线使用。这种方法对于象我国许多地区暴雨历时很长且多次起伏，各次降雨间历时又相差较大的情况，硬性将时间坐标统一为相对坐标，所得结果很难有代表性。因而在我国多用通过暴雨时程分配的分析以求得雨型。

在推理公式法中，一般不考虑暴雨面分布不均匀的影响，而多采用暴雨在面上均匀一致的假定。多数推理公式中暴雨参数直接应用点暴雨分析资料，也有的推理公式中考虑了由点雨量折算为面雨量的方法，例如英国黎查兹（B.D.Richards）在1944年给出暴雨公式为

$$a = \frac{If(F)}{t+1}, \quad (1-9)$$

式中 I 为暴雨最大强度； $f(F)$ 为点面折减系数。苏联罗斯托莫夫（Г.Д.Ростомов）也曾提出暴雨点面折减公式：

$$\beta = e^{-z} \sqrt{\Omega/T} \sqrt[3]{H}, \quad (1-10)$$

式中 β 为暴雨点面折减系数； e 为自然对数的底； Ω 为暴雨笼罩面积； T 为降雨历时； H 为降雨量； Z 为地理经验性系数。

这些点面折减公式多用动点动面的暴雨面分布图为根据来求取其中的参数，而点雨量则利用定点观测值的分析成果，动点（代表历次暴雨的暴雨中心）雨量必然大于定点雨量。因而用定点雨量套用动点动面的点面折减关系，是受一定限制的。根据水利水电科学研究院水文研究所陈志恺等的研究^[4]，认为定点雨量可以代表一定范围内的面雨量，而不必进行折减；除非经过论证，认为定点雨量资料恰好每次都与这个流域的暴雨中心相合。但这种情形一般是比较罕见的。

由于暴雨公式本身是经验性质的，其建立必须紧密结合地区的暴雨资料；但在推理公式中使用的暴雨公式，形式又不便过分繁杂，如果要求暴雨公式完全反映当地的暴雨历时强度变化规律，则暴雨公式形式势必相当复杂，且将出现一个地点一个形式，结果会造成应用上的困难。因此在建立暴雨公式时，常尽量保持公式形式一致，而对其中包括的经验性参数，则结合当地暴雨资料分析定量，按分区给值或绘成等值线图使用。暴雨公式的形式，也是检验推理公式是否能在本地区使用的一个条件。

数理统计法在水文计算领域中开始广泛应用以来，对暴雨公式中某些参数的定量也有了一定的标准。各国在暴雨研究中进行了大量的暴雨频率分析的工作，这些工作有助于推理公式本身精度的提高，但也同时提出了设计暴雨与设计洪水间的频率关系问题。到目前为止，多数推理公式中都采用了以设计暴雨的频率作为设计标准的假定，即认为在设计条件下暴雨与洪水是以同频率的组合形式出现的。这样一种考虑是否恰当，曾引起不少的争论，但至今并未获得彻底证明。爱尔兰纳希（J.E.Nash）^[5]在1958年曾经证明了设计条件下暴雨与洪水同频率出现的可能性。我们的认识是：暴雨与洪水之间，应当认为是可以存在着相关关系的，否则就不可以建立由暴雨来推算洪水的方法。但相关关系又不能等同于函数关系。因此在某一特定的暴雨值条件下，应当得

出不同的洪水值，其中暴雨和洪水的同频率组合，接近两者的平均相关组合关系。自然从概率论的角度来看，只有两者具有绝对函数关系时，才有可能出现绝对同频率组合。但由于暴雨愈大，暴雨在产流过程中的损失量所占的相对比例就愈小，因而在大暴雨时，暴雨和洪水同频率出现的可能性就愈大。所以在设计条件下大暴雨和洪水的同频率假定可以被认为是近似的。

一百多年来，在配合推理公式的暴雨研究方面取得了很大的进展，直至今天在不断改进推理公式的形式并提高其实用性方面，暴雨研究仍然具有很突出的意义。对于推理公式来说，将根据定点雨量资料分析的参数如何转换为流域面雨量的概念，包括暴雨递减指数 n 的变化规律（无论在不同历时的情况下或不同频率的情况下），以及如何考虑暴雨面分布不均匀影响及暴雨中心移动等问题，仍然迫切需要进行研究。

（三）损失计算在推理公式中的发展综述

在早期的推理公式中，损失常用径流系数计算，但也有用扣除总损失深或平均损失率的方法。例如尼古拉依在1909年给出的公式

$$Q = 16.7 \left(\frac{H - \Sigma i}{t} \right) \varphi F, \quad (1-11)$$

及多尔果夫（Н.Е. Долгов）在1916年给出的公式

$$Q = 1.953(a - i)F, \quad (1-12)$$

均属此类。式中 Σi 及 i 分别为总损失深和损失率。此后，在推理公式法中，损失计算一直分为两大类型，即径流系数法和扣损法。

在未考虑设计暴雨时程变化特征时，无论径流系数法或扣损法，实际上都是打折扣的概念。即在推理公式中，首先将暴雨过程概化为以降雨历时为底的矩形，然后用径流系数法或扣损法扣除损失。如果对扣损法也采用在时程上均匀一致的平均损失率的概念，则在这种情况下，无论用径流系数法或扣损法，降雨历时与产流历时都是完全相等的。在考虑设计暴雨的时程分配特征以