

流域水文模拟

——新安江模型与陕北模型

赵人俊

水利电力出版社

流域水文模拟

——新安江模型与陕北模型

赵人俊

水利电力出版社

内 容 提 要

流域水文模型是近二十多年来发展起来的一种新技术。本书简要阐述了流域模型发展的一般趋向，并着重介绍华东水利学院水文预报教研室在这方面的研究成果——新安江模型与陕北模型。主要内容有：产汇流基本概念，蓄满产流模型，超渗产流模型，蒸散发计算模型，马斯京根法，新安江模型，流域模型的检验与比较。书末附有计算程序与算例，便于读者参考。

本书适合于从事水文、水利、水电的科研、技术人员阅读，亦可供有关院校师生参考。

流 域 水 文 模 型 ——新安江模型与陕北模型

赵大俊



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

787×1092毫米 32开本 5.75印张 126千字
1984年1月第一版 1984年1月北京第一次印刷

印数 0001—4640册 定价 1.15元

书号 15149·5310

目 录

一、引言	1
1. 水文方法概述	2
2. 水文模拟技术	7
二、产汇流基本概念	11
1. 产流	11
2. 河槽汇流	17
3. 地下汇流	22
4. 流域汇流	27
三、蓄满产流模型	32
1. 模型结构	32
2. FC的推求	40
3. 论证	43
4. 与其他方法的关系	47
四、超渗(不蓄满)产流模型	55
1. 模型结构	55
2. 论证	63
3. 资料均化问题	68
五、蒸散发计算模型	71
1. 蒸散发原理	71
2. 蒸散发计算模型	73
3. 蒸散发能力的推求	78

六、马斯京根法	83
1. 经验参数马斯京根法	83
2. 马斯京根法理论	87
3. 入流条件问题	92
4. 长河段问题	97
5. 非线性解	100
6. 关于滞后演算法	103
七、新安江模型	106
1. 模型结构	106
2. 参数调试方法	109
3. 参数的区域规律	116
4. 新安江模型的改进	118
八、流域模型的检验与比较	131
1. 发展现状	131
2. 模型结构的检验	140
3. 模型的选择与应用	144
九、结束语	147
附录 A 计算机程序 (TI-59)	150
附录 B 新安江模型算例	164
附录 C 计算机程序 (PC-1500)	172

一、引 言

流域水文模拟是二十几年来发展起来的一种新技术，它对流域上发生的水文过程进行模拟，建成数学模型，在计算机上实现。这种技术在解决水文实际问题与进行水文规律研究上都起着显著的作用。我们华东水利学院水文预报教研组的同事们，从六十年代初就开始研究这个问题，不过那时不用“模型”这个名词，而是用“函数化”，“成因化”，“流域水量平衡计算”等名词，其意义就是把一些经验规律加以物理解释，用严密的数学方式表达出来，再把各个水文过程综合起来，形成全流域的水量平衡计算系统，这就是后来所称的流域水文模型。根据我们的研究成果，提出了两个模型，新安江模型与陕北模型，供各地试用。

水文模型有多种类别，有确定性模型与不确定性模型——随机模型，我们研究的是确定性模型。其中又分黑箱子模型与概念性模型，我们所研究的是概念性模型。这也就是要对流域上发生的水文过程进行模拟，具有物理概念的模型，或可称白箱子模型。

把流域看成为一个系统，已知其输入，要求其输出。在推算中要把系统的状态，即流域上发生的水文过程，模拟计算出来。在我们的研究范围内，输入是降雨过程，还没有包括融雪、水质、泥沙等项，因此所建的是降雨径流流域模型。系统的输出是流域出口断面的流量过程。其实，还有一个输入是流域的蒸散发能力，一个输出是流域实际的蒸散

发，这样就构成了一个完整的流域水量平衡计算系统。这个系统的状态，就是土壤湿度，河槽与地下水的蓄量，等等。

1. 水文方法概述

为什么概念性模型在二十几年来得到比较快的发展与比较广泛的应用呢？除了电子计算机的普及应用起了很大的作用以外，还有水文科学技术上的原因。在概念性模型迅速发展以前，在应用水文学方面，采用着几种类型的方法，现在的概念性模型，是在这个基础上发展起来的。下面首先简要讨论一下这些方法，它们是：1）数学物理方法，2）单位线，3）经验相关，4）概化推理。

（1）数学物理方法：

这是经典的途径，它具有严密的物理概念与数学公式，科学性很强。在水文上采用的例子，有圣维南(St. Venant)不稳定流方程组、渗流与下渗方程、对流扩散方程等。当条件具备时，用这种方法能得到很好的效果。有时计算比较复杂，但应用计算机后，问题不难解决。真正的问题在于客观条件。这里有两个条件：1）现象比较单纯，边界条件简单易定。例如下渗方程，是根据一维、均质土层、下端无限、地面无积水等条件建立起来的。但对于具体流域，一般就很难符合这种条件。2）资料比较充足可靠，能满足方程的要求。愈是严密的方法，对原始资料的数量与质量的要求也愈高。如果达不到这种要求，方程式的优越性就显示不出来。例如糙率在明渠水力学计算中的作用很大，但它很难定准，如果数字不准而方程很复杂，其效果有时反而不如更简单易用的方法为好。

水文现象发生在地表这个范围内，与大气圈、地壳圈、生物圈都有密切的关系，不象分子扩散、弹簧振动现象那样

单纯，而是属于综合性的自然现象。因此，能直接应用数学物理方法的场合是很有限的。这样，在水文工作中，常常应用所谓“水文学方法”来解决问题。所谓“水文学方法”，就是有别于力学、热学等经典数理方法的一种简化方法，如单位线、经验相关、概化推理等。但应当说明，数理方法在水文上的应用虽然受到限制，但它仍是理论概念的基础。也就是说，“水文学方法”的是非标准，应归结于数学物理过程。例如，各种河道洪水演算方法的理论基础是圣维南方程组。与它符合就是正确的，不符合就是简化的或是错误的。

(2) 单位线：

单位线的定义是系统的脉冲反应。这个概念完全是数学的，不牵涉物理实质。如果系统是线性的，单位线是不变的；如果系统是时变的，单位线也是时变的；如果系统是非线性的，则单位线是随输入输出而变的。这些概念完全是逻辑性的，不是物理性的。单位线概念只要求系统反应，不论系统的状态，因此称为黑箱子模型。

单位线的概念与方法简单，要求的资料少，又具有一定精度，因此在水文上起了很大的作用。但由于它缺乏物理概念，所以在应用与发展上受到极大限制。例如对资料范围外的外延，区域性的综合，人类活动影响的考虑等问题，它就几乎无能为力。非线性问题的处理，只用数学方法，而不从物理概念出发，也是很难奏效的。

单位线为什么能在水文上应用成功？原因在于流域与河网是一个高阻尼的系统，即调蓄作用很大[20]。所以不论是什么流域，单位线总是存在，而且是一条单峰的有偏的曲线。这就是单位线概念的物理基础。如果是另外现象，例如是风浪，那是个波动问题，就不好用单位线来解决。单位线本身

虽然没有物理概念，但有物理基础，不是单纯的工具。或以为单位线的实质只是往复演算，只要能往复还原即可，不需要有物理意义。其实不然，没有物理基础，只靠往复还原是不行的，例如风浪就不能这样做。单位线既行之有效，必有其物理基础。原先不明确，以后可以找到。水文上这样的例子很多，例如马斯京根法，原先是纯经验的，现在它的物理意义已经完全清楚了。单位线的物理实质，现在实际上也已经知道了，见二，4、（1）。不过它与流域边界条件的联系问题还没有完全解决，还不能付诸实用。但是黑箱子的本质是白箱子，只是有待于认识而已。如果真是黑箱子，那末单位线也不成立，黑箱子模型也建立不起来。

（3）经验相关：

这是在水文上最常用最易解决实际问题的方法。方法是把水文现象的原因与结果，自变量与因变量的数值观测出来，然后用相关统计的方法，求出它们之间的定量关系。求相关关系可以用图解法，也可以用数解法。最常见的例子，如降雨径流合轴相关图。

经验相关法中的自变量与因变量，不同于系统的输入与输出。经验相关中的变量，都指单事件，如次降雨量，次地面径流量，洪峰流量等，不是过程。而系统的输入与输出则应当是过程。经验相关没有对过程进行模拟，没有状态变量，不能作连续模拟，因此不能输入到系统中去。

制作经验相关关系还是有物理概念作指导的，方案完成之后也还可以作一些合理性的检查。但是，这些手段都还不严密，不完整，最后决定方案的是统计原则，即误差最小的原则。因此，方法的性质还是属于相关。

经验相关法虽然简单实用，但具有很重要的缺陷。它与

数学物理方法正好相反，优缺点正好互补。由于经验相关方案的决定条件是误差最小原则，而不是客观水文规律本身，因此它往往会带来内部矛盾，即总结果与其部分结果之间的矛盾。例如，按次洪资料可以作出降雨径流相关图，但如把全年每次降雨都按图查得其产流量，然后求和，其得数会与实测年径流有甚大的差异。又如把一次复合洪水作为一次洪水来计算与分割为几次来计算，总结果是不一样的。把降雨径流相关图用来查时段产流量时，有两种查法：一种是把每时段看成是一次洪水，逐时段改算前期影响雨量；另一种是把次总量进行内部划分，按雨量累积过程推求产流量的累积过程。这两种方法的逻辑根据是同样有理的，但其所得结果是不同的。原因就在于经验相关没有过程，一遇到过程内部的问题它就不能正确处理了。同样，在两个过程的分界线问题上也是如此。例如次雨量从哪一天算起，是没有明确标准的，降雨量算了这一天，前期影响雨量就不算这一天，可以自由处理。有时点据精度不高，但把处理改动一下，可能就改好了，但这种精度是虚假的。

经验相关图具有虚假精度的原因还有一些。例如，次洪实测径流量是经过划分地下水等操作才求得的，这些操作还不十分客观，因此自由处理的余地不小，这也可能造成虚假的精度。其次，经验相关图的定线不受任何其他条件的约束，只要精度最高就行，因此如果点据少而定线复杂，则就会有很大的虚假精度。令 n 为点据数， m 为函数中待求参数的个数，则标准差的数值是与 $\sqrt{n/(n-m)}$ 成正比的。直线方程的 m 值是自变量个数加1，曲线方程的 m 还要大，所以如果 $n = 5$ ， $m = 3$ ，则 $\sqrt{n/(n-m)} = 1.58$ ，实际误差当比图线显示的误差大58%，虚假性很大。

经验相关在应用中最难解决的问题是外延，本流域内资料范围以外的外延与对缺乏水文资料地区的外延。经验相关是统计规律，原则上只能用于样本条件范围内的内插，不能用于范围外的外延。如果要外延，则一定要作出某种假定。人类活动影响问题与规划设计问题相当于缺乏实测水文资料问题，因此用经验相关的方法来处理也是十分不利的。而数学物理方法的途径，也就是按成因推理的途径，就没有这种困难。它只要改变某些边界条件，就可以解决预测问题，不必依赖实测资料来作统计。因为水文规律本身是不变的。至于边界条件的改变，可以用多种办法来取得，可以设计，可以移用同条件地区的资料，可以做专门的实验，可以根据某种假定来推求，等等。

应当把经验相关图与图算区别开来。图算是解方程式的一种办法，查图等于计算，不过把计算工作预先做好了，应用时只查结果，就简便了。而经验相关图不表示任何计算，查图只表示内插。这两者从外形上看起来很相象，但基本性质是不同的。

经验相关把因果关系直接定量联系起来，不问其间的过程，因此在原则上就不能使用中间过程的知识与资料。例如应用降雨径流相关图，完全可以不问损失的项目与性质，产流的机制等问题。即使有这方面的知识与资料，也不能直接进入方案，只能用于参考与论证。这显然也是一种缺点。

(4) 概化推理：

推理公式就是这种方法的代表。它不是经验相关，而是以成因为根据，用推理方法作计算的，因此原则上可用于缺乏资料的地方。但它与数学物理方法有很大的不同，它把水文规律与边界条件作了很大的概化，例如把流域概化为矩形，

把损失过程概化为常数，等等。这些概化可能与实际情况相差很大，但为了要进行推理计算，以便把结果直接简单地表达为原因的函数，必须作出这种概化。这是一种设计性质的方法，以方便实用并与其他设计环节相适应为原则，对精度的要求可以低一些。这种方法的优缺点是很明显的。等流时线法虽然曾具备比较严格的数学函数形式，但由于对水力学问题作了过分的概化，因此也就与推理公式的性质相近。

2. 水文模拟技术

水文模拟的方法是对上述各种方法取长补短并结合起来而形成的。它一方面有别于数学物理方法的严密性，另一方面又有别于概化推理方法的设计性。它吸取了经验相关方法中合理的物理概念，但又把它系统化成一个推理计算的格式。它可以采用比较严密的部分结构，也可以采用比较粗略的或黑箱子模型作为部分结构。所谓模拟，就是把客观条件加以简化，把次要的与偶发的因素去掉，保留主要的与基本的规律部分，根据这种条件建立起有物理意义的方程式或逻辑判断，进行计算。模型是否合理，简化是否得当，应以是否能反映客观水文规律为标准。这样的模型，可以在水利工程的规划设计管理调度中起作用，成为系统工程中的一个组成部分。

模型必须表现为一个逻辑上严密完整的计算系统。要求在逻辑上严密完整，不一定所有环节都用方程式表示，也可以用逻辑判断。例如，当雨强大于渗强时下渗等于下渗能力，当雨强小于渗强时下渗等于降雨，就是一个逻辑判断。要求完整，就是要符合流域水量平衡，有全局安排，不然就会引进许多相关性。例如，只处理地面径流而不问其他，则不但在生产上不能满足要求，而且对洪水的模拟也是片面的。很可能在方案中包含了许多不符合实际的处理，所得的结论是

虚假的。

概念性模型必然是一个数学模型，能够在计算机上实现，模型与计算机的思路是完全一致的。模型的计算步骤与方法，称为结构，相当于计算机的程序，可以用框图或流程图表示。在模型结构当中，需要有一定的参数以具体规定流域的水文特性，这也就相当于计算机程序中需要读进的常量。有了结构与参数之后，流域的水文规律与水文特性就完整地描述出来了，只要有输入，就可计算出相应的输出。至于模型的状态，则是变量，它完全是由模型推算出来的，不是实测值。

模型就是结构加参数，水文模拟的目的，就在于确定模型的结构与参数。结构是根据我们对水文规律的认识而构造出来的，参数是流域的水文特性，是一些原则上可以实测的物理量。因此，要决定模型的结构与参数，不一定要有实测的水文资料，只要有地貌地质等方面的资料就可以了。但通常我们都利用实测水文资料来检验结构与参数，并常用优选方法来推求模型的参数，这是一种鉴别性质的方法，用以弥补其他资料之不足。这时虽然也用水文资料，但用法是与经验相关完全不同的。举一个例，我们可以直接根据蒸发实验的资料决定有关蒸发的参数，但也可以用校核年径流计算结果的方法来决定这些参数。这样做的目的在于求参数，不是为了计算年径流，更不是为年径流找相关关系。参数定好后，不必只用于计算年径流，同样也适用于计算次径流、日径流、时段径流等。结构与参数代表了流域的水文规律与水文特性，具有一般性的意义。至于推求它们的方法，是另一个问题，是完全可以因地制宜灵活运用。

这里要提到通常所说的往返一致的问题。在经验相关法中，往返一致是完全必要的，是什么条件的样本所作出的关

系，只能用于同条件的其他情况中去。用孤立洪峰所建的峰量关系，不能用于复式洪峰。用退水段资料作出的槽蓄曲线，不能用于涨水段。用次洪资料作出的降雨径流关系，不能用于年径流。但在模型中就不受这个限制，不论用什么方法得到了结构与参数以后，就能算出水文过程，与所据的方法及资料没有直接关系。上面讨论过的经验相关法所不能解决的问题，如外延、区域规律、人类活动影响等，原则上都是可以解决的。

模型的计算方案不但完全客观，而且完全统一，没有内部矛盾。模型要模拟过程，因此都采用时段递推的格式，一年是各天加起来的，一次是各时段加起来的，其间不存在过程划分上的矛盾。计算方法对任何时段都一律，不会产生推理上的内部矛盾。这种统一性是十分重要的，只有做到这一点，才使得模型具有普遍意义，其结构可通用于广大地区，其参数具有区域规律。模型不只是一种工具，而且代表了水文规律，具有科学性。

有一种看法是值得很好讨论的：已知的只有降雨与径流两端，中间过程概无实测资料，因此，不论黑箱子也好，经验相关也好，概念模型也好，都是一回事，应用精度也都差不多，只有测出中间过程，进行严格的数学物理方法计算，才能提高水平。概念性模型中的物理概念都是虚拟的，没有经过实测证明的，因此任何方法只要精度高就行，不必追究其客观规律性与科学性。

笔者认为，这个讨论的核心，是科学假设的作用问题。一个模型实际上就是对一个流域的水文规律所提出来的一种科学假设。它提出了观点与条件，根据它进行推理，得出了状态过程与输出过程，这样就形成了一个科学思维的系统。

对于同一个流域，可以有不同的模型，也就是说可以有不同的假设。哪一种对，哪一种更好，可以通过各种方法来检验。可以检验出流过程，可以检验状态过程，可以作专门的实验观测，可以与其他流域作对比，可以对不同的假设进行对比，等等。现在没有条件检验，以后会有。如果有某一种假设，对所有能检验的地方都检验过而无矛盾，则它成立。但今后还可能被修正，被推翻。例如，以地球为中心的学说，在一千年间都是成立的，但被哥白尼所推翻了。万有引力到现在为止还是一个假设，因为没有直接的证明。但据此假设所作的推论，都是对的，因此它成立。在水文上，也可以应用这种科学思维的方法。如果不用，非要依靠直接观测资料才能作计算，那末，一个流域水量平衡计算的方案是建立不起来的，一个完整的流域水文过程的观点是不可能产生的。

同样的资料只能得到同样的结果，也不尽然。只有经验相关才如此，如果容许有假设与推理的思维，则结果可以大不相同。对于同一个现象，根据同样的资料，可以有完全不同的解释，这在科学史上例子是很多的。在这许多不同观点中，有的是对的，有的是错的，有的是好的，有的是坏的，都将在不断的验证中加以辨明。一定可以看到，由于正确思维的作用，同样的资料可以得出好得多的结果。

在水文领域里，应当采取更多种途径的方法。除上述常用的水文学方法以外，凡是新的研究成果都要引用，如山坡水文学、不稳定流计算、随机过程等。同时还要强调，在思想方法上，应当更多地注意假设、推理、判断等科学思维的巨大作用，从单纯的经验相关中逐步提高，把经验系统化、理论化，既提高水文工作的实用效果，又提高水文工作的科学水平。

二、产汇流基本概念

概念性模型的基础是产汇流理论，特别是其中的基本物理概念，因为模拟是要根据这种概念进行的。

1. 产流

最早的产流理论是由霍尔顿 (R.E.Horton) 在 1933 年提出的，这就是著名的下渗理论。当雨强小于下渗能力时，所有的降雨都被土壤吸收，而当它大于下渗能力时，吸收率只能等于下渗能力，其余部分就是产流量。土壤表面有如筛子，能把降雨筛成两部分：一部分形成坡面流以后进入河道；另一部分先进入土壤，然后或渗透而成为地下水，或由蒸发而重新进入大气。这是从模拟观点出发所建成的产流模型，它使许多水文问题得到简化，便于处理。

霍尔顿在 1940 年对小面积人工降雨资料进行了分析，得出下渗能力随时间呈指数变化的经验公式：

$$f = f_0 + (f_\infty - f_0) e^{-Kt} \quad (2-1)$$

式中： f 为下渗能力 (毫米/小时)， f_0 为起始下渗能力， f_∞ 为稳定下渗， K 为随土质而变的系数， t 是时间。

这一个概念很快被推广应用，并取得好效果。它与单位线概念相结合，形成了完整的流域水文模型。实际上到现在为止，很多模型的基本概念就是下渗理论加单位线。

在霍尔顿以后，关于下渗理论的研究很多。应用土壤水分运动理论的研究成果，有格林-安帕特 (Green-Ampt)、菲立浦 (Philip) 等；采用经验公式形式的，有科斯加可夫 (Костяков)、霍尔坦 (Holtan) 等。

霍尔顿把产流与汇流的研究联系起来，他研究了填注过程与坡面积水过程，并化了很大力量来研究坡面流的水力学问题，至今可用。他还把这些观点应用到坡面产沙问题上去。

霍尔顿还把下渗理论与流量过程线分析的经验结合起来，对流域产流现象作出科学的分析，见图 2-1。从流量过程线分析的经验可知，在无雨期，流域有比较缓慢的退水过程，这是地下径流形成的。而在多雨期，则有各式各样的洪峰，常常陡涨陡落，这是地面径流造成的。流量过程线的形状，主要决定于这两种水源的组合。而下渗理论正好提供了地下地面径流形成的基本概念，霍尔顿据此把流域产流分成三个类型：

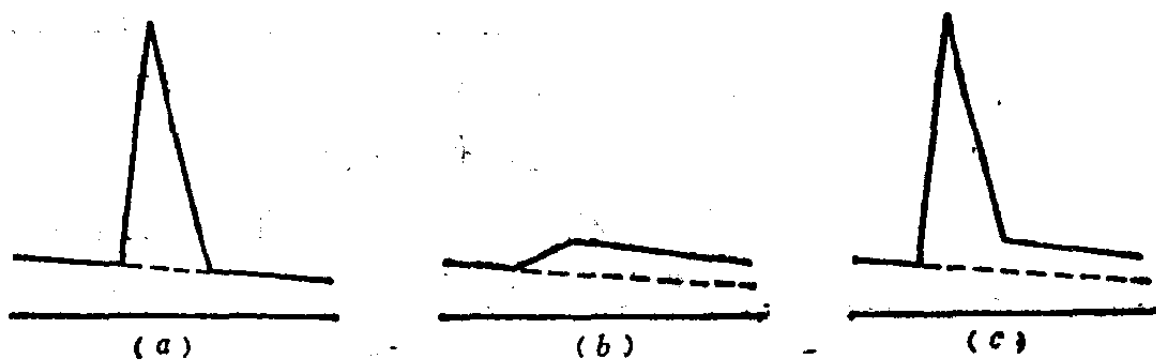


图 2-1 霍尔顿的流域产流分类

(a) $i > f$, $W < W_T$; (b) $i < f$, $W > W_T$; (c) $i > f$, $W > W_T$

(a) 雨强很大而历时很短的洪水。由于雨强 i 大于下渗能力 f ，产生了地面径流。且由于历时短，下渗量小，田间缺水量不可能补足，不会产生地下径流。在作流量过程线分析时，洪前退水曲线向后外延可与洪后退水曲线重合，表示本次降雨没有产生地下径流。这种洪水全部是地面径流，因此洪峰陡涨陡落。

(b) 雨时很长而强度很小的洪水。由于雨强小于下渗