

产流模式的发现与发展

芮孝芳

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:回顾了产流理论的起源,指出 Horton 产流理论、Kohler 与 Linsley 的 5 变量合轴相关图形式的降雨径流相关图,以及 Dunne 通过实验对 Horton 产流理论的拓展,奠定了产流理论和流域产流量计算方法的基础。总结了我国自 20 世纪 50 年代以来在这一领域的主要实践和理论探索,指出中国学者发现的“蓄满产流”和“超渗产流”两种流域产流模式,以及局部产流问题及其处理方法,是对水文学的重要贡献。通过回顾与总结,系统深入地探讨了产流理论和降雨径流相关图形式与流域产流模式之间的关系,试图开启发展、完善流域产流量计算方法的思路。

关键词:Horton 产流理论;Dunne 产流理论;降雨径流相关图;蓄满产流;超渗产流;局部产流

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)01-0001-06

The discovery and development of runoff formation models//RUI Xiaofang(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The origin of the runoff formation theory is reviewed. Horton's runoff formation theory, the rainfall-runoff relation curve of the form of five variables found by Kohler and Linsley and Dunne's runoff formation played the foundational role in runoff formation theory and runoff yield calculation. The main Chinese practice and theory research in this field since the 1950s are summarized and it is pointed out that the "runoff formation at the natural storage", the "runoff formation in excess of infiltration", and the partial area contribution to storm runoff discovered by Chinese scholars are a great contribution to hydrology. Through review and summary, the relationships between runoff formation theory, the rainfall-runoff relation curve, and runoff formation models are deeply discussed to develop and perfect the calculation method of watershed runoff yield.

Key words: Horton's runoff formation theory; Dunne's runoff formation theory; rainfall-runoff relation curve; runoff formation at natural storage; runoff formation in excess of infiltration; partial area contribution to storm runoff

1 一个耐人寻味的现象

1935 年 Horton 发表了一篇题为《地表径流现象》的论文^[1],指出降雨产流受控于两个条件:一是降雨强度与地面下渗能力的对比,二是下渗水量与包气带缺水量的对比。当降雨强度超过地面下渗能力时,超渗部分成为地面径流,这就是所谓的超渗地面径流。当下渗水量扣除包气带蒸发超过包气带缺水量时,超持部分成为地下径流,这种所谓地下径流就是后人所指的壤中水径流和地下水径流之和。就产流机制而言,前者属于界面通量机制,后者属于土层持蓄机制。就“门槛”效应而言,前者以地面下渗容量为“门槛”,后者以包气带田间持水量为“门槛”^[2]。这是有史以来提出的第一个产流理论,但

这一理论并未立即应用于解决实际问题,在随后的数十年中也似乎无人问津。中国学者了解 Horton 产流理论的完整内容已是 20 世纪 70 年代末了。

1951 年美国学者 Kohler 和 Linsley 根据实测降雨和径流资料分析制作了世界上第一张降雨径流相关图,并提出了前期影响雨量 P_a 的概念和计算方法。这张在水文学发展史上有重要影响的降雨径流相关图是一张 5 变量合轴相关图(图 1)^[3],它考虑了前期影响雨量 P_a 、季节和暴雨历时对降雨径流形成的影响,其中前期影响雨量 P_a 反映流域的初始干湿程度、季节代表蒸发 E 的影响、暴雨历时体现降雨强度的作用。之后,这种 5 变量合轴相关图形式的降雨径流相关图很快被世界上许多国家引进,风靡一时。1979 年 Linsley 又将 5 变量降雨径流相

关图改为 4 变量降雨径流相关图(图 2)^[4]。但令人奇怪的是,在 Linsley 等看来,这些工作似乎与 Horton 早年提出的产流理论毫不相干。

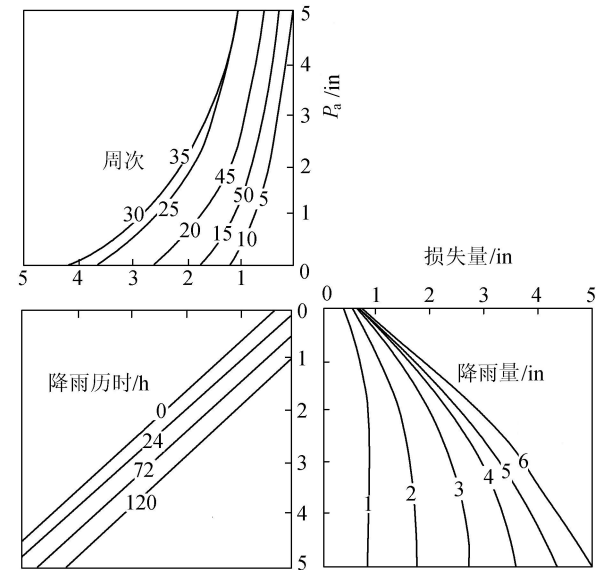


图 1 Kohler 和 Linsley1951 年给出的

5 变量降雨径流相关图^[3] (1 in=2.54 cm)

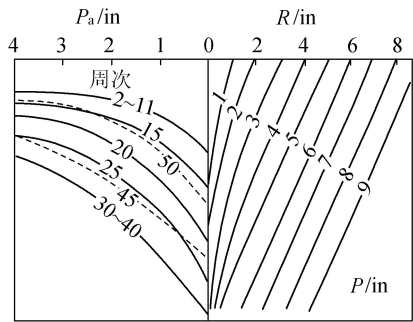


图 2 Linsley1979 年给出的 4 变量降雨径流相关图^[4]

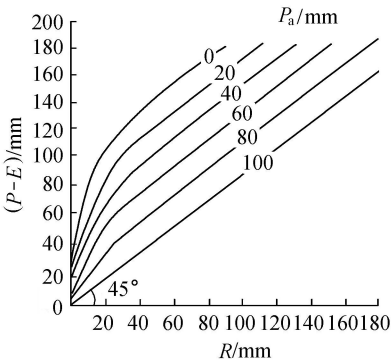
为什么 Horton 提出的理论未能指导 Kohler 和 Linsley 对 5 变量合轴相关图形式的降雨径流相关图的研制?为什么 Kohler 和 Linsley 没有用自己研制的降雨径流相关图来检验 Horton 理论?这确实有点耐人寻味。

2 产流理论在中国的实践与深化

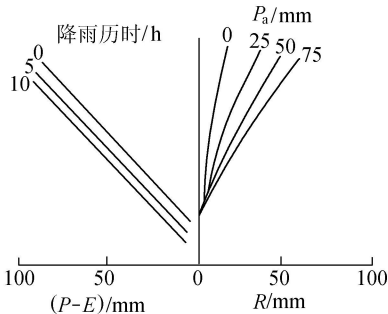
中国自 1952 年起开始发展水文预报事业, Kohler 和 Linsley 研制的 5 变量合轴相关图形式的降雨径流相关图也开始引入中国。利用中国江河流域实测降雨和径流资料制作降雨径流相关图一时间成为许多水文学者的所爱。到 20 世纪 60 年代初,降雨径流相关图作为一种流域产流量计算方法已在中国得到普遍使用^[5-8],它与早先传入中国的 Sherman 单位线和 Muskingum 法一起成为当时最具代表性的产汇流计算方法^[9]。事实上,这 3 种方法不仅对中国,而且对世界水文科学的发展产生了极

其深刻的影响。

中国幅员辽阔,气候条件和下垫面情况复杂多样,中国制作降雨径流相关图的实践必将大大丰富由 Kohler 和 Linsley 开创的研究领域。在 Kohler 和 Linsley 5 变量合轴相关图的基础上,中国提出了两种形式的降雨径流相关图:一是以前期影响雨量 P_a 为参变数的 4 变量降雨径流相关图(图 3(a))^[7-8];二是以前期影响雨量 P_a 和降雨强度为参变数的 5 变量降雨径流相关图(图 3(b))^[6,8]。前一类降雨径流相关图主要适合于湿润地区,后一类降雨径流相关图主要适合于干旱和半干旱地区,特别是年雨量小于 200 mm 的中国陕北黄土高原地区。对于前一类降雨径流相关图,当降雨量大于一定值时将趋于与横坐标成 45° 角度的斜线,而当降雨量小于这一一定值时,将为凹向横坐标一方的曲线。这个定值对不同的流域不一样,对同一流域也随前期影响雨量 P_a 而不同。若在干旱半干旱地区使用前一类降雨径流相关图,则点据十分散乱。若将后一类降雨径流相关图用于湿润地区则看不出有提高精度的作用,反而显得多此一举。以上发现的前提是在制作降雨径流相关图时采用流域产流量而非地面径流量。如果只对地面径流制作降雨径流相关图,那么无论在干旱半干旱地区,或者在湿润地区,均适用后一类形式的降雨径流相关图,也就是降雨强度的影响不可忽略。在湿润地区,若建立流域产流量与地下水径流量的相关图,则会出现两种情况(图 4)^[2]:一



(a)4变量相关图



(b)5变量相关图

图 3 中国使用的降雨径流相关图

是降雨历时对其影响明显;二是随着流域产流量的增加,地下水径流量将趋于一定值,而与降雨历时无关。这反映了蓄满产流模式下,地下水径流的形成有两种机理。

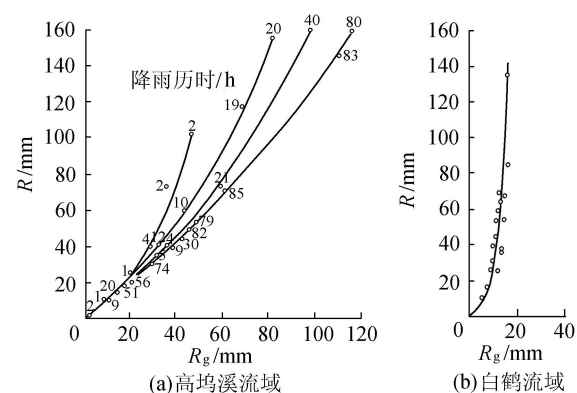


图4 总径流与地下水径流的相关关系

中国的实践不仅深化了对 Kohler 和 Linsley 研制的 5 变量和 4 变量合轴相关图形式的降雨径流关系的理解,而且为日后发现蓄满产流模式奠定了基础。

3 产流模式的发现

如果在流域上取一微分面积,并考察一场降雨过程终了时刻该微分面积所对应的均质包气带的水量平衡方程式,那么根据 Horton 产流理论中所阐明的产流的物理条件,不难发现这个水量平衡方程式必为下列两种情况之一:一是一场降雨终了包气带含水量已达到田间持水量,这时包气带的水量平衡方程式为

$$P' = E' + (W'_m - W'_0) + R'_s + R'_g \quad (1)$$

二是一场降雨终了包气带含水量未达到田间持水量。这时包气带的水量平衡方程式为

$$P' = E' + (W'_e - W'_0) + R'_s \quad (2)$$

式中: P' 为微分面积上的次降雨量; E' 为微分面积上的雨期蒸散发量; W'_0 为微分面积上雨始时包气带含水量; W'_m 为微分面积包气带的田间持水量; W'_e 为微分面积上雨终时包气带含水量; R'_s 为在微分面积上产生的超渗地面径流量; R'_g 为在微分面积上产生的地下径流量。

这种取微分面积的目的实际上是为了消除降雨和下垫面条件空间分布不均的影响。

式(1)和(2)又分别可表为

$$P' = E' + (W'_m - W'_0) + R' \quad (3)$$

$$P' = E' + (W'_e - W'_0) + R' \quad (4)$$

式中: R' 为微分面积上一场降雨形成的地面径流和地下径流之和,称为“总径流”。对于一场降雨终了包气带含水量已达到田间持水量的情况, $R' = R'_s + R'_g$;而对于一场降雨终了包气带含水量未达到田间

持水量的情况, R' 仅包括 R'_s 。

分析式(3)和式(4)可以看出,如果一场降雨终止时包气带含水量已达到田间持水量,那么这场降雨形成的总径流量只受到雨期蒸散发、雨始包气带含水量的影响,因为包气带田间持水量是一个常数;如果一场降雨终止时包气带含水量未达到田间持水量,那么这场降雨形成的总径流量不仅受到雨期蒸散发、雨始包气带含水量的影响,而且还受到雨终包气带含水量的影响,因为不同次降雨由于强度和历时不同,雨终包气带含水量显然是不一样的。有鉴于此,可以将式(3)和式(4)分别写成^[10]:

$$R' = f(P', E', W'_0) \quad (5)$$

$$R' = f(P', E', W'_0, W'_e) \quad (6)$$

但由下渗理论可知, W'_e 受控于降雨强度 i 与地面下渗容量 f_p 的对比关系,而 f_p 又取决于 W'_0 ,所以式(6)又可写成:

$$R' = f(P', E', W'_0, i) \quad (7)$$

不难看出,式(5)正是前述中国学者提出的以前期影响雨量为参变量的降雨径流相关图的理论依据,而式(7)正是前述中国学者提出的以前期影响雨量和降雨强度为参变量的降雨径流相关图的理论依据。这样就将 Horton 于 1935 年提出的产流理论与 Kohler 和 Linsley 于 1951 年研制的 5 变量合轴相关图形式的降雨径流关系联系起来了。这是中国学者对水文学的一个重要贡献。

就总径流的产生而言,式(3)或式(5)揭示的产流原因是 $P' - E' > W'_m - W'_0$,即包气带缺水得到满足,或者包气带含水量达到田间持水量,才能产生径流,由于这个缘故,称之为“蓄满产流”模式。而式(4)或式(6)揭示的产流原因是 $i > f_p$,即满足降雨强度超过地面下渗能力,才有径流产生,由于这个缘故,称之为“超渗产流”模式。

4 局部产流问题

一个流域总是由无数个微分面积集合而成,每一个微分面积的包气带田间持水量不尽相同,缺水量也可能大相径庭,因此,即使一场降雨的空间分布均匀,也不可能保证流域上每个微分面积都能满足条件 $P' - E' > W'_m - W'_0$ 而“蓄满产流”。只有当降雨量大到能使流域上包气带缺水最大的微分面积也能满足这个条件,才会出现全流域“蓄满产流”。

中国学者在制作湿润地区降雨径流相关图时,早就发现当流域平均降雨量 $\bar{P}$ 较小时,计算的 R 常常会小于实测的 R ,而当 $\bar{P}$ 较大时却不出现此种情况。起初用超渗产流来解释,后来发现这种解释不合理,因为 $\bar{P}$ 较小时,高强度暴雨的出现不太可能,

因而发生超渗产流的可能性不大。到了 20 世纪 60 年代,终于揭开这个谜,原来是局部产流问题^[5]。

若一个流域的产流属于“蓄满产流”模式,则一场降雨产生的流域产流量应等于满足条件 $P' - E' > W'_m - W'_0$ 的那些微分面积产生的径流量之总和,即

$$R = \frac{1}{A} \int_{A_e} R' df \quad (8)$$

将式(3)代入式(8),有

$$R = \frac{1}{A} \int_{A_e} [P' - E' - (W'_m - W'_0)] df = \frac{1}{A} \int_{A_e} (P' - E') df - \frac{1}{A} \int_{A_e} W'_m df + \frac{1}{A} \int_{A_e} W'_0 df \quad (9)$$

式中: R 为流域产流量; A 为流域面积; A_e 为产流面积, $A_e \leq A$; df 为微分面积。

现在来展开式(9)右边各项。对式(9)右边第一项,有

$$\begin{aligned} & \frac{1}{A} \int_{A_e} (P' - E') df = \\ & \frac{1}{A} \left[\int_A (P' - E') df - \int_{A_n} (P' - E') df \right] = \\ & (\bar{P} - \bar{E}) - \frac{A_n}{A} \frac{\int_A (P' - E') df}{A_n} \end{aligned} \quad (10)$$

对式(9)右边第二项,有

$$\begin{aligned} & \frac{1}{A} \int_{A_e} W'_m df = \frac{1}{A} \int_A W'_m df - \frac{1}{A} \int_{A_n} W'_m df = \\ & W_m - \frac{1}{A} \int_{A_n} W'_m df = W_m - \frac{A_n}{A} \frac{\int_{A_n} W'_m df}{A_n} \end{aligned} \quad (11)$$

对式(9)右边第三项,有

$$\begin{aligned} & \frac{1}{A} \int_{A_e} W'_0 df = \frac{1}{A} \int_A W'_0 df - \frac{1}{A} \int_{A_n} W'_0 df = \\ & W_0 - \frac{1}{A} \int_{A_n} W'_0 df = W_0 - \frac{A_n}{A} \frac{\int_{A_n} W'_0 df}{A_n} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\bar{P}$ 为流域平均降雨量; $\bar{E}$ 为流域平均蒸散发量; W_m 和 W_0 分别为最大流域蓄水容量和雨始时刻流域蓄水容量,均为流域平均值; A_n 为不产流面积。

将式(10)、式(11)和式(12)代入式(9),得

$$\begin{aligned} R = & \bar{P} - \bar{E} - (W_m - W_0) - \\ & \frac{A_n}{A} \left[\frac{1}{A_n} \int_{A_n} (P' - E') df - \right. \\ & \left. \frac{1}{A_n} \int_{A_n} W'_m df + \frac{1}{A_n} \int_{A_n} W'_0 df \right] \end{aligned} \quad (13)$$

不难理解,式(13)中之 $\frac{1}{A_n} \int_{A_n} (P' - E') df$ 、

$\frac{1}{A_n} \int_{A_n} W'_m df$ 和 $\frac{1}{A_n} \int_{A_n} W'_0 df$ 均为不产流面积上的平均值,若将它们分别记为 $\bar{P}_n - \bar{E}_n$ 、 $W_{m,n}$ 和 $W_{0,n}$,又令不

产流面积之比 $\frac{A_n}{A}$ 为 α ,则式(13)可写成简洁的形式:

$$R = \bar{P} - \bar{E} - (W_m - W_0) - \alpha(\bar{P}_n - \bar{E}_n - W_{m,n} + W_{0,n}) \quad (14)$$

由式(14)可以看出,若一场降雨能使全流域蓄满产流,则由于 $\alpha=0$,流域产流量应为

$$R = \bar{P} - \bar{E} - (W_m - W_0) \quad (15)$$

若一场降雨属于局部流域蓄满产流,则由于 $\bar{P}_n - W_{m,n} + W_{0,n} < 0$,而 $\alpha > 0$,流域产流量应为

$$R > \bar{P} - \bar{E} - (W_m - W_0) \quad (16)$$

式(15)表明,在全流域蓄满产流情况下,以 W_0 为变量的降雨径流相关线为与横坐标成 45° 夹角的斜线。而式(16)表明,在局部产流情况下,以 W_0 为变量的降雨径流相关线为其切线与横坐标夹角大于 45° 的曲线。这与中国学者的实践完全一致。

对于“超渗产流”模式可作同样分析,不过结论要比蓄满产流模式复杂得多。

国外关于局部产流问题的研究要比中国学者迟 10 a 左右。Linsley 等^[11] 在评价 Dunne 等^[12-13] 对发现局部产流问题所做的贡献时指出:“统计证据、野外观测和逻辑学告诉我们,径流很少在流域上均匀地产生。雨量和强度的变化、土壤特征、植被、前期含水量和地形都促使发生复杂的性能类型,其中大多数暴雨所产生的径流仅来自最靠近河槽的较小部分流域面积。这些源地的确定需要远比估算降雨径流所用的通常可得资料更为详细的资料,从而阻挠了沿着完全理论途径来解决这个问题。水源源地的相对统计恒定性似乎是存在的,因此经验推导降雨径流关系的可靠性远较从物理分析得来的为好。”

如果将 Linsley 这一评论性语言送给中国学者,那么似乎还有不够之处,因为中国学者不仅发现了局部产流问题,而且给出了解决问题的方法。

5 流域蓄水容量曲线的意义

根据流域产流量的形成过程,欲正确计算出流域上一场降雨所形成的流域产流量,除了必须寻找出适用的产流模式,还必须掌握产流面积变化问题。但由式(15)和式(13)知,如果一场降雨终了能达到全流域蓄满产流,那么按式(15)就可以将这场降雨产生的总径流计算出来,这并不存在什么困难。而如果一场降雨终了仍旧为局部产流,那么就必须按式(13)才能计算出这场降雨产生的总径流量。不言而喻,这是一件十分困难的事。由流域降雨径流形成的物理过程可知,之所以有局部产流现象存在,就是因为降雨空间分布和下垫面条件空间分布不均匀,然而要同时考虑导致局部产流的两个“不均匀”

性,不仅在当时的科技水平下十分困难,就是现在也仍然困难。相对而言,下垫面条件空间不均匀分布是静态的,一般并不随时间而变,而降雨空间不均匀分布是动态的,不同时刻降雨的空间分布可能存在极大的差异。显然,考虑下垫面条件空间分布不均造成的局部产流似乎要比考虑降雨空间分布不均造成的局部产流容易些。这种科学思路就导致了流域蓄水容量曲线的引入^[5,9]。

流域蓄水容量曲线是表达流域包气带田间持水量小于等于某值的面积占全流域面积的比例与该值之间关系的曲线(图5)。对一个流域,它唯一客观地存在,并为单调递增曲线。这条曲线的面积就是全流域包气带含水量均达到田间持水量时的流域平均包气带含水量,称为最大流域蓄水容量 W'_m 。流域蓄水容量曲线可表达成下列函数形式:

$$\alpha = \varphi(W'_m) \quad (17)$$

式中: α 为流域上小于等于该 W'_m 的面积对流域面积之比值。

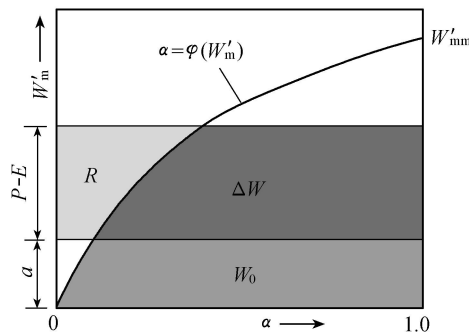


图5 流域蓄水容量曲线

有了流域蓄水容量曲线的函数表达式(17),容易证明:

$$\int_a^{W'_m} [1 - \varphi(W'_m)] dW'_m = W_m \quad (18)$$

与雨始流域蓄水容量分布形状有关的 a 值应满足:

$$\int_0^a [1 - \varphi(W'_m)] dW'_m = W_0 \quad (19)$$

最终可导出流域产流量的计算公式^[10]为

$$R = (P - E) - \int_a^{P-E+a} [1 - \varphi(W'_m)] dW'_m \quad (20)$$

当 $P-E+a > W'_m$ (W'_m 为流域上各点 W'_m 中最大值)时,式(20)变成全流域产流的流域产流量计算公式:

$$R = P - E - (W_m - W_0) \quad (21)$$

流域蓄水容量曲线的引进只能考虑降雨空间分布均匀时由于下垫面条件空间分布不均对流域产流量造成的影响,这就决定了式(20)只能用于面积较小的流域。如果还必须考虑降雨空间分布不均对流域产流量的影响,一个现实的做法就是将一个流

域划分成若干个相对较小的子流域,对每个子流域先用式(20)计算子流域产流量,然后用加权平均法求得流域产流量。更好的能同时考虑降雨和下垫面条件空间分布不均对流域产流量影响的方法,有待更先进的科学技术来解决。

对于“超渗产流”模式,只要引进下渗容量面积分配曲线,就可以按照与上述相同的思路建立流域产流量计算方法。

6 Dunne 对产流理论的贡献

大约在20世纪60年代至70年代初,Dunne等^[14]在研究中遇到了一些自然界用Horton产流理论解释不通的产流现象,这些现象是:在有些地区包气带表层很疏松,地面下渗容量很大,而一场降雨的降雨强度一般并不是很大,按照Horton产流理论,这种情况应当不太可能产生地面径流,但事实上却能观测到地面径流;一场降雨形成的洪水过程的退水段包含着丰富的水文信息,洪水一般由多种径流成分组成,由于不同径流成分汇流速度有快慢差异,因此在其退水段上就会形成一些转折点,按照Horton产流理论,洪水的退水段只可能有一个转折点,但实际上存在两个转折点的情况比较普遍,有3个转折点的情况也并非稀遇,拥有更多转折点的情况也不是不可能。Dunne带着这些问题,通过大量的科学实验,终于有了重大的发现。

Dunne的第一个发现是饱和地面径流的形成条件,从而回答了Horton产流理论不能解释的第一个问题。Dunne的第二个发现是壤中水径流的形成条件,从而回答了Horton产流理论不能解释的第二个问题。Dunne的第三个发现是山坡汇流的回归流和窜流现象,这虽不属于产流理论问题,但向人们展示了流域汇流是一种极其复杂的水量运动。

Dunne的新产流理论给人的启示是深刻的,它不仅圆满地回答了Horton产流理论所不能解释的产流现象,改变了地面径流形成的单机制论,丰富了地下径流的内涵,较大地拓展了“蓄满产流”和“超渗产流”两种产流模式的适用性,而且使人们看到了一个科学家是如何发现问题、提出问题,如何针对问题进行科学实验,如何通过科学实验抓住问题实质得出新的见解的。

7 结 语

20世纪30年代中期和50年代初期在美国发生了两件对水文学产生重大而深远影响的事: Horton产流理论的提出和Kohler及Linsley等5变量合轴相关图形式的降雨径流相关图的研制。虽然

他们都在围绕着同一个问题努力耕耘着,但奇怪的是双方当事人似乎并不知道对方在做些什么。这一水文科学史上有趣的事件,看来是难以进一步考证清楚了。中国学者了解并接受 Horton 产流理论和 5 变量合轴相关图形式的降雨径流相关图,与这两个事件出现的顺序正好相反:引进 5 变量合轴相关图形式的降雨径流相关图是在 20 世纪 50 年代初期,在先;了解并接受 Horton 产流理论是在 20 世纪 70 年代初,在后。

从大量降雨径流相关图的制作经验中中国学者发现,不同气候条件下影响降雨径流关系的因子不一样;总径流的降雨径流相关图、地面径流的降雨径流相关图和地下水径流的降雨径流相关图影响因子也不一样。在此基础上于 20 世纪 60 年代中期提出了“蓄满产流”和“超渗产流”两种基本产流模式。中国学者的这些独创性研究与 Horton 产流理论具有惊人的一致。表 1 是笔者^[15]给出的 Horton 产流理论与产流模式及相应的降雨径流关系。20 世纪 70 年代 Dunne 提出的新产流理论不仅揭示了包气带中具有相对不透水层的产流机制,圆满回答了 Horton 不能解释的问题,这不仅是 Horton 产流理论的重大发展,而且使中国学者在产流研究方面有了新的提升。“蓄满产流”不只是二水源的,也可能是三水源的,甚至是一水源的;“超渗产流”不总是一水源的,也可以是二水源的,地面径流即使是饱和和地面径流,总径流也可能属于“超渗产流”模式。地下径流应是壤中水径流和地下水径流之总称,有地下径流并不是“蓄满产流”的“专利”,“超渗产流”的总径流量也可能有壤中水径流产生。产生地下水径流才是“蓄满产流”的标志之一。现在所说的“蓄满产流”和“超渗产流”,尽管名词相同,但其内涵已拓宽了。表 2 是笔者^[15]给出的 Dunne 产流理论与产流模式及相应的降雨径流关系。

表 1 Horton 产流理论与产流模式及相应的降雨径流关系

i 与 f_p 的对比	$I-E$ 与 D 的对比	流域产流量组成	产流模式	降雨径流相关图形式
$i < f_p$	$I-E < D$	0	不产流	
$i > f_p$	$I-E < D$	R_s	超渗产流	图 3(b)
$i > f_p$	$I-E > D$	R_s, R_g	蓄满产流	图 3(a)
$i < f_p$	$I-E > D$	R_g	蓄满产流	图 3(a)

注: I 为下渗水量; E 为流域包气带蒸散发量; D 为流域包气带至田间持水量的缺水量。

中国学者发现“局部产流”问题,也就是“产流面积变化”问题,约比国外早 10 a,并认识到由降雨确定流域产流量必须受到产流模式和产流面积变化两个方面的控制,通过引进流域蓄水容量曲线和下渗容量面积分配曲线,以及划分子流域的方法,为计

表 2 Dunne 产流理论与产流模式及相应的降雨径流关系

i 与 f_p 的对比	I_A-E_A 与 D_A 和 D_{SA} 的对比	I_B-E_B 与 D_B 的对比	流域产流量组成	产流模式	降雨径流相关图形式
$i < f_p$	$I_A-E_A < D_A$	$I_B-E_B < D_B$	0	不产流	
$i < f_p$	$D_A < I_A-E_A < D_{SA}$	$I_B-E_B < D_B$	R_{int}	超渗产流	图 3(b)
$i < f_p$	$I_A-E_A = D_{SA}$	$I_B-E_B < D_B$	R_{sat}, R_{int}	超渗产流	图 3(b)
$i < f_p$	$D_A < I_A-E_A < D_{SA}$	$I_B-E_B < D_B$	R_{int}, R_g	蓄满产流	图 3(a)
$i < f_p$	$I_A-E_A = D_{SA}$	$I_B-E_B > D_B$	R_{sat}, R_{int}, R_g	蓄满产流	图 3(a)
$i > f_p$	$I_A-E_A < D_A$	$I_B-E_B < D_B$	R_s	超渗产流	图 3(b)
$i > f_p$	$D_A < I_A-E_A < D_{SA}$	$I_B-E_B < D_B$	R_s, R_{int}	超渗产流	图 3(b)
$i > f_p$	$D_A < I_A-E_A < D_{SA}$	$I_B-E_B > D_B$	R_s, R_{int}, R_g	蓄满产流	图 3(a)

注: I_A, I_B 为分别为 A, B 层的下渗水量; E_A, E_B 为分别为 A, B 层的流域包气带蒸散发量; D_A, D_B 为分别为 A, B 层流域包气带至田间持水量的缺水量; D_{SA} 为 A 层流域包气带至饱和含水量的缺水量; R_{int} 为壤中水径流; R_{sat} 为饱和地面径流。

算流域产流量奠定了科学基础。

参考文献:

[1] HORTON R E. Surface runoff phenomena[R]. [S. l.]: Horton Hydrology Laboratory, 1935.

[2] 芮孝芳. 降雨产流机制几个问题的讨论[J]. 水利学报, 1996 (9): 22-26. (RUI Xiaofang. Discussion of some problems on mechanism of runoff yield[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(9):22-26. (in Chinese))

[3] KOHLER M A, LINSLEY R K. Predicting the runoff form storm rainfall [R]. [S. l.]: U. S. Weather Bur Res, 1951.

[4] LINSLEY R K, FRANZINI J B. Water-resurces engineering[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1978.

[5] 赵人俊, 庄一鸽. 降雨径流关系的区域规律[J]. 华东水利学院学报, 1963 (1): 53-68. (ZHAO Renjun, ZHUANG Yiling. Regional law of the rainfall runoff relationship[J]. Journal of East China Institute of Water Conservancy, 1963(1):53-68. (in Chinese))

[6] 邓洁霖. 超渗产流情况下降雨径流预报方法的建议[J]. 水利水电技术:水文副刊, 1965 (6): 18-21. (DENG Jielin. Rainfall runoff forecasting method recommended in the case of excess seepage[J]. Water Resources and Hydropower Technology: Hydrological Supplement, 1965(6):18-21. (in Chinese))

[7] 水利电力部福建省水文总站. 闽江沙溪降雨径流关系的探讨[J]. 水利水电技术:水文副刊, 1965 (7): 13-18. (FU JINA PROVINCE HYDROLOGICAL TERMINUS OF WATER CONSERVATION ELECTRIC POWER MINISTRY. Discussion of Minjiang River Shaxi rainfall runoff relations [J]. Water Resources and Hydropower Technology: Hydrological Supplement, 1965 (7): 13-18. (in Chinese))

[8] 曾代球, 雷加忠. 短期洪水预报中两个问题的研究[J]. 水利水电技术:水文副刊, 1965 (5): 16-19. (ZENG Daiqiu, LEI Jiazhong. Study on the two questions of the short term flood fore casting[J]. Water Resources and Hydropower Technology: Hydrological Supplement, 1965 (5): 16-19. (in Chinese))

(下转第 26 页)

- [5] 闫旭锋,易子靖,刘同宣,等.渐变河道水流结构及局部水头损失特性分析[J].长江科学院院报,2011,28(9):1-5. (YAN Xufeng, YI Zijing, LIU Tonghuan, et al. Flow structure and characteristics of local head loss in transition channel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(9): 1-5. (in Chinese))
- [6] ARRUDA J M, LIMA E-SILVA A L F, NETO A S, et al. Numerical simulation of channel flows using the immersed boundary method [C]//IDELSOHN S R, SONZOGNI V E, CARDONA A. South-American Congress on Computational Mechanics. Santa Fe-Paraná, Argentina; [s. n.], 2002.
- [7] LIMAE-SILVA A F E, NETO A S, DAMASCENO J J R. Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method [J]. Journal of Computational Physics, 2003, 189 (2): 351-370.
- [8] LIMAE-SILVA A F E, SILVAAR R D, NETO A S. Numerical simulation of two-dimensional complex flows around bluff bodies using the immersed boundary [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2007, 29(4): 379-387.
- [9] 李大鸣,陈虹,李世森.河道洪水演进的二维水流数学模型[J].天津大学学报,1998,31(4):439-446. (LI Daming, CHEN Hong, LI Shishen. A 2-D numerical model of propelling flood in the river [J]. Journal of Tianjin University, 1998, 31(4): 439-446. (in Chinese))
- [10] 张细兵,殷瑞兰.平面二维水流泥沙数值模拟[J].水科学进展,2002,13(6):665-669. (ZHANG Xibing, YIN Ruilan. Planar 2-D flow and sediment mathematical modeling[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(6): 665-669. (in Chinese))
- [11] 张大伟,程晓陶,黄金池.大坝瞬时溃决水流数值模拟:以 Malpasset 水库为例[J].水利水电科技进展, 2009, 29(5): 1-4. (ZHANG Dawei, CHENG Xiaotao, Huang Jinchi. Numerical flow modeling of instant dam failure: a case study of the Malpasset Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 1-4. (in Chinese))
- [12] 叶如意,王攀.曹娥江至宁波引水工程平面二维水流数值模拟[J].水资源保护,2010,26(5):24-28. (YE Ruyi, WANG Pan. Two-dimensional numerical simulation of flow for water diversion project from Cao'e River to Ningbo [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(5): 24-28. (in Chinese))
- [13] 方神光,黄胜伟.纯隐格式的混合有限分析法在广雅桥水流数值模拟中的应用[J].水利水电科技进展,2010,30(6):53-57. (FANG Shengguang, HUANG Shengwei. Application of implicit scheme hybrid finite analytic method in numerical simulation of flow effect by Guangya Bridge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(6): 53-57. (in Chinese))
- [14] 王君超.平面二维河流数值模拟方法及其应用[J].中国科教创新导刊,2010(11):93-94. (WANG Junchao. A two-dimensional numerical simulation method and its application in the river [J]. China Education Innovation Herald, 2010(11): 93-94. (in Chinese))
- [15] THOMPSON J F, WARSI Z U A, WAYNE C M. Numerical grid generation: foundation and applications [M]. New York: Elsevier Science Publishing Co., 1985.
- [16] 陈月华.干支流交汇河段水流特性计算研究[D].南京:南京水利科学研究院,2007.
- [17] PATANKAR S V. A calculation procedure for two-dimensional elliptic situations [J]. Numerical Heat Transfer, 1981, 4(4): 409-425.

(收稿日期:2012-03-06 编辑:骆超)

(上接第6页)

- [9] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社, 1984: 32-70.
- [10] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社, 2004.
- [11] LINSLEY R K, KOHLER M A, PAULHUS J L H. Engineering hydrology [M]. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [12] DUNNE T, BLACK R D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed [J]. Water Resources Research, 1970, 6(5): 1296-1311.
- [13] BETSON R P, MARIUS J P. Source areas of storm runoff [J]. Water Resources Research, 1969, 5(3): 574-582.
- [14] DUNNE T, BLACK R D. An experimental investigation of runoff prediction in permeable soils [J]. Water Resources Research, 1970, 6(2): 478-490.
- [15] 芮孝芳,宫兴龙,张超,等.流域产流分析及计算[J].水力发电学报,2009,28(6):146-156. (RUI Xiaofang, GONG Xinglong, ZHANG Chao, et al. Formation and calculation of watershed runoff yield [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6): 146-156. (in Chinese))

(收稿日期:2012-09-29 编辑:马敏峰)