

森林小流域的降雨出流机制的探讨

唐常源

(中山大学地理系)

平田健正

(日本国立环境研究所)

村岡浩尔

(日本大阪大学土木工学系)

提 要: 本文简述了森林小流域中降雨—截流—下渗—地中水—地表水各个环节的作用。作者认为,在降雨出流过程中,下渗和土壤中的快速流是非常重要的部分,而地表出流所占的比例是比较小的。一般来说,森林土壤的下渗率比较大,森林流域的贮水能力也是很可观的。这些就决定了森林流域的产流不是霍顿产流,也不同于现在流行的许多产流理论 and 模式。在湿润地区形成产流区时的特点并非是表层土壤首先饱和,而是地下水位或被地下水支持的饱和和毛细管带上升到表面附近使该区发生饱和,因而产生以及维持这种饱和状态所需的垂直下渗和地中水的侧向补给是流域是否发生产流的先决条件之一,而地表流可认为是回归流。此外,流域地中水产流对降雨响应过程可认为是由作用在毛细管带中的水的压力平衡受破坏而引起的,这个压力通过毛细管带传递到饱和带。作用在毛细管带中的水的压力平衡受破坏的原因可以是封存在土壤中的被瞬间压缩的空气压力作用,也可以是降雨直接接触到已发展至地表的非饱和和毛细管带的上缘。

关键词: 森林流域 降雨径流 地中水 毛细管带

森林小区中降雨—出流的过程是掌握流域水循环机制,土壤侵蚀、搬运、堆积机制,水质形成机制等的最重要的一环。近年关于降雨—出流的研究有了长足的进展。Betson(1964)认为在湿润地域霍顿地表流的产生是十分少的,提出了降雨—出流过程中产流机制的新想法。其中,揭示了在降雨—出流过程中产流的重要因素是地中水(包括土壤水和地下水)而不是霍顿地表流(Whipkey, 1965; Weyman, 1970; Dunne and Black, 1970, b; 田中等, 1982; Yasuhaia, 1984)。这些研究成果对理解和分析森林流域坡面中水的流动具有重要的意义。

至今为止的研究结果表明,在森林小区降雨—出流过程中影响产生降雨径流(storm-flow)的来源为分为三种:即饱和地表流(Saturation overland flow)、地下暴雨径流(subsurface stormflow)和地下水(groundwater)。Freeze(1972, 1974)认为其中流速大的饱和地表流是主要的,而地下暴雨径流和地下水除了在河道下切比较深、土壤导水系数大的凸形坡面以外,供给产流的水量是不多的。这些研究的存在问题在于对回归流的解释和

达西公式的适用范围的理解。

70年代中期使用各种示踪方法分离水文过程线, 许多的研究结果表明降雨径流中的大部分是有地中水供给的(表1)。但是, 这些研究都是一些间接的方法, 况且形成降雨径流所需要的大量快速的地下水是如何进入河道这个过程还不清楚。综上所述, 到目前为止关于降雨径流的研究中尚存在许多未解决的问题。本文通过分析这些问题, 力图对影响形成降雨径流各种因素进行重新评价, 探讨山地森林小流域的降雨-出流形成机制。

表 1 用环境同位素得到的水文过程线分离结果(田中正1982)

Results of hydrograph analysed by isotopes

研究 者	实验 场所	流域面积 (km ²)	(标高) (m)	同 位 素	出流流量中地下 水所占的比例	流域情况
Dinuer 等 (1970)	捷克	2.7	1000-1554	T	总流量的63%	70%草地
Martinec 等 (1970)	瑞士	43.3	1668-3146	T	总流量的 37-89%	3%是森林 97%草地
Fritz 等 (1976)	加拿大	22.0	400-780	¹⁸ O	总流量的90% 峰值的60%	90%是森林 和草地
Sklash 等 (1979)	加拿大	1.2	760-800	¹⁸ O	峰值的 60-80%	大部分是森林
田中等(1980)	日本	19.1	20-30	T	总流量的42%	城市流域
田中等(1980)	日本	20.1	20-30	T	总流量的78%	自然流域
Harrmann 等 (1980)	德国	18.7	670-1801	D	总流量的53-65%	降雨径流
					总流量的72-86%	融雪径流
Rodhe(1981)	瑞典	6.8	18-55	¹⁸ O	总流量的67-78%	83%森林

一、森林的截流与土壤特性

(一) 降雨、截流、蒸散发过程

从对森林生态系统的输入的角度来看, 降雨时的树木截流相对于林外雨来说是损失量, 因此它在径流分析和流域水平衡计算中应该进行考虑。

森林流域中的降雨的一部分首先落在树叶或树干上面, 当重力和表面张力达到平衡的状况下, 保留在树叶或树干上。这部分水中的一部分被蒸散发掉。如果降在树叶或树干上的雨过多, 破坏了重力和表面张力的平衡, 一部分的水直接滴到地表面, 另一部分则顺着树叶或树干流到地面。前者叫滴下雨量(Drip), 后者叫树干流(Stemflow)。此外, 穿过森林

枝叶的空隙直接降到地表面的雨叫通过雨量 (Throughfall)。滴下雨量和通过雨量之和叫林内雨。所以，通常将林外雨减去林内雨和树干流即为降雨期间的树木截流。

一般来说，林外雨和林内雨及树干流之间的关系可以用直线关系来表示。图 1 中所示的是日本茨城县筑波山试验流域的调查结果。考虑到树木截流量的变化不大，随着总雨量的增大，林内雨及树干流在总雨量中占的比重越大。但是，林外雨和林内雨之间的相关关系比较

好，而林外雨和树干流之间的关系就差一点了。从水量来看，林内雨为林外雨的75.4%，而树干流仅为林外雨的4.3%。按照相关关系式计算，在该流域中，当总雨量为5.8mm以上时才出现林内雨，而树干流的发生则要求总雨量超过9.9mm。

林内雨及树干流的重要性不但在于它们的量的多少，更重要在于它们的时空间的变化。根据在广州中山大学试验观测点的对湿地松林林外雨、林内雨及树干流随时间变化的结果表明。在前期七天没有降雨的条件下，林内雨出现在降雨开始后的30分钟，而树干流约滞后230分钟。一般可以把林内雨看作是面源，把树干流看作是点源。

降雨中的树冠蒸散发过程是十分复杂的。一般认为，降雨中的树冠蒸散发具有随着降雨强度的增加而按比例增大。降雨后在湿润的枝叶上蒸散发强度很大。

(二) 森林土壤的孔隙特性和保水性能

森林土壤的孔隙可以根据野外观测和经验进行分类(表 2)。水的移动在大孔隙里受重力的影响，在中孔隙里即受重力和弱小毛细管力的影响，在小孔隙里却受较大的毛细管力和重力的影响，在细小孔隙里只受毛细管力的作用而重力的影响完全没有。图 2 所示的是日本茨城

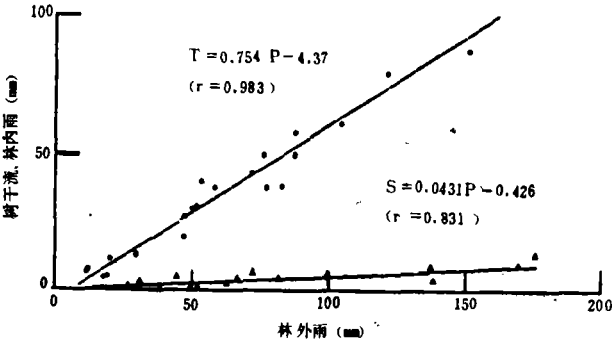


图 1 林外雨 (P) 和林内雨 (T) 及树干流 (S) 之间的相关关系

Correlation among rainfall, throughfall and stemflow.

表 2 森林土壤的分类

Classification of forested soils

项目 \ 分类	巨大孔隙	大孔隙	中孔隙	小孔隙	细小孔隙
PF	0 以下	0-0.6	0.7-1.7	1.7-2.7	2.7-4.2
孔径 (mm)	> 3	0.6-3	0.06-0.6	0.006-0.06	<0.006
A 层	+++++	+++++	+++++	+++++	+++++
B 层	+++	+++	+++++	+++++	+++++
C 层	+	+	+++	+++++	+++++

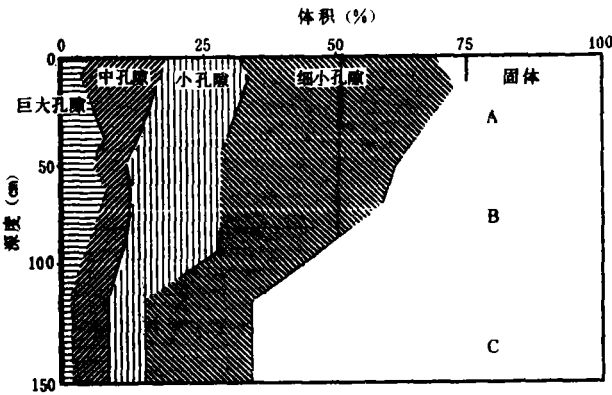


图 2 森林土壤的孔隙分布
Distribution of pores in forested soils.

县筑波山森林试验流域的土壤垂直分布。从图中可见，大孔隙在森林流域坡面的任何部位按A、B、C、层的顺序不断减少，中空隙在A和B层中大量存在，而在C层中减少，小空隙无论在A、B或C层中都同样存在。A层主要是动物活动和根系发育的场所，大空隙（piping flow）的分布比较多，使森林地的下渗能力显著增大，成为不发生地表径流的原因。而且无论在什么类型的降雨情况下，A层中只有非饱和和垂直下渗（Unsaturated infiltration）而不会出现饱和和垂直下渗

（Saturated infiltration）。当A层中出现饱和侧方流（Saturated lateral flow）的时候，水的运动是非达西流。假定把C层的下部看作是不透水层的话，降雨后森林坡面中的水的运动是由非饱和垂直下渗和B层的一部分以及C层中出现的饱和侧方流来构成。因此，要说明森林土壤的孔隙特性和保水性能时，必须指出非饱和垂直下渗以及其发生的土层的厚度。

二、雨水的流动过程

一般说来，森林坡面的表层土的透水系数比雨量强度大的情况比较普遍，因此降到森林坡面上的雨将全部渗入地下。根据佐藤等的研究报告（1956，1957），不论是针叶林，阔叶林或地形条件如何，自然森林流域的最终下渗能力都在100mm以上，只有林道部分的最终下渗能力在10mm前后（表3）。

表 3 不同植被条件下的平均最终渗透率
The average hydraulic conductivities under different vegetation conditions.

植 被 条 件	林 地		伐采后	灌木 草地	滑坡后	林 道
	针叶林地	阔叶林地				
流域数	13	10	13	3	8	4
最终渗透率 (mm/h)	246	272	160	191	99	11

下渗是水向土壤中的运动，当有降雨补给的时候，这个过程将受地表入渗、土壤层的输水和土壤前期含水量的影响。前人对此进行许多研究，提出了霍顿经验公式、饱和渗流理论公式和非饱和渗流理论公式等的计算方法。菲利浦（philip, 1957）发表了以下的计算下渗

的公式:

$$f = A + \frac{S}{2\sqrt{t}} \quad (1)$$

这里 S 是吸收能,由下渗湿润锋线的速度来决定; A 取值近似等于饱和导水系数; t 是时间。由(1)式可知,下渗直接受土壤特性、土壤初始含水状态和供给水时间的控制。在这种意义上,森林流域生态系统通过影响上述诸因素的分布与特性,进而决定了森林流域的水循环特性。目前用来计算下渗的公式所得到的结果往往基于如下的情况,即降雨时土壤具有吸收雨水的功能,随着时间的推移这种能力逐渐减弱。当下渗等于降雨强度的时刻以后,土壤表面开始发生积水。但是,上面已指出了由于在森林流域中表层土的导水系数一般比雨量强度大,因而出现积水的情况极少。当然,流域出现积水的现象可以在降雨强度超过下渗率以后,但在森林中尤其是在河道附近出现积水主要由地下水抬升至地表附近引起的。前者一般的叫霍顿(Horton)型产流,而来者叫顿尼(Dunne)型产流。由于森林土壤的特性所定,在地表面只能见到顿尼型产流,而霍顿型产流可认为发生在A层和其下面土层的连结面上。

土壤中的非饱和垂直渗透是以降雨(新水)把原来贮藏在土壤中的土壤水(旧水)推出的形式进行,其运动速度满足达西定律。当在地下水存在条件下发生垂直渗透时,随着下渗锋线的移动,被封在土壤中空气受到压缩,这个压力一旦传递到非饱和毛细管带的上缘,毛细管带中的水和地下水立即发生移动。此外,零通面的存在及其分布决定了非饱和渗透的方向。

图3表示的是在一次降雨过程中,日本茨城县筑波山森林试验流域中地中水的断面变化情况。

当雨后持续天晴的情况下,零通面在坡面的上部降至B层,而坡面的中部和下部的B层中存在侧方饱和流。坡面上部和下部的土壤水力梯度开始增大。零通面以上部分土壤中的水分向上运动参加蒸发,其下部分土壤中的水分向下运动补给饱和带,然后通过饱和带流出流域。

如果这时出现中或小雨的话,零通面随即消失,整个坡面表层断面发生非饱和和地表附近的A层中出现快速流,这时管流(Piping flow)起了十分大的作用。土壤层比较薄的坡面上部中非饱和垂直渗透到达C层,促成饱和和侧方流的出现。流域中的洪水主要由坡面下部产流区的出流提供。尽管坡面上部的

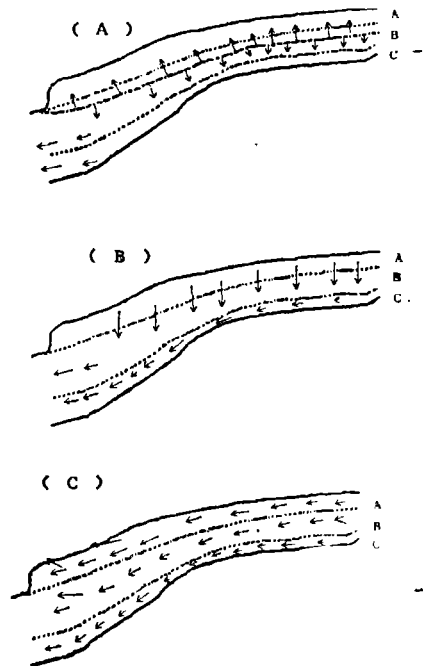


图3 森林试验流域中地中水的断面变化情况
(A)雨后持续天晴;(B)中或小雨时;(C)大雨时
The subsurface water movements in the forested experimental basin (A) before the rain, (B) during the small rain, and (C) during the heavy rain.

雨水对洪水出流的贡献并不大,但它帮助维持坡面下部产流区的存在。

如果这时出现大雨的话,非饱和垂直渗透到达C层,B、C层中原有的前期土壤水补给坡面下部的地下水。由于A层中的饱和侧方流的流速比较大,地下水面的上升速度变缓甚至停止。地上水在坡面上以回归流(Return flow)的形式出露地面,成为流域洪水出流的一部分。

三、地下水出流的降雨响应过程

由第四部分的论述可知,在流域洪水出流的过程中,地下水出流起了十分重要的作用。如果地下水面发生迅速的上升的话,地下水出流将会急剧地增加。造成这种迅速变化的原因有三种:(1)水通过土壤介质补给地下水;(2)水通过土壤大孔隙补给地下水;(3)利用封存在土壤中的被瞬间压缩的空气传递压力而引起地下水位的上升。

一般说来,雨水通过土壤介质补给地下水,主要是遵循达西定律。水的运动表现为降雨以推流的形式降雨把原来贮藏在土壤中的土壤水推出补给地下水。这种方式要求有比较大的动水比降和导水系数。当然,如果饱和毛管带在地表附近分布的垂直渗透。降雨的初期原来贮藏在土壤中的土壤水被压出。降雨的中期饱和面上升情况下,微小的降雨也可能引起大幅的地下水位变化(Gillham, 1984)。雨水通过土壤大孔隙补给地下水在森林流域中是经常看到的现象。在大孔隙中,水的运动处在紊流状态,流速相对比较大。在大雨的时候,降雨不仅通过土壤大孔隙补给地下水,甚至可以通过土壤大孔隙直接参加流域产流过程。

然而,在流域中大部分地方中,非饱和毛管带分布在表层附近。这时即使没有土壤大孔隙以及导水系数很小,在降雨期间利用封存在土壤中的被瞬间压缩的空气传递压力也能引起地下水位的迅速上升。

在有地下水存在的时候,地下水面以上的包气带里会形成一个毛细管带,它由非饱和毛细管带和饱和毛细管带两部分组成。这些毛细管带尽管可以是饱和或非饱和的,但是它们都能传递压力。关于包气带里的毛细管带在降雨-出流过程中的作用,平田等(1989)的研究可以充分地说明。在一维砂箱实验中使用的是丰浦标准砂。为了使砂箱里的砂分布均一,制作砂箱($\Phi 200 \times 120\text{cm}$)时采用了排水法。砂样的饱和导水系数为 0.019cm/s -1,比重为2.50,中值粒径为 0.15mm 。在实验中利用人工降雨分别模拟地表积水和不积水的条件,通过测定负压、空气压和出流量的变化,探讨降雨过程中地下水位迅速上升的问题。图4表示了降雨强度为 800mm/h 条件下(不发生积水),不同深度总压力水头 T 、土壤水张力 W 和出流量变化过程的实验结果。这里总压力水头 T 可用以下的式计算:

$$T = P + Z \quad (2)$$

其中, P 为压力水头(由土壤水张力和空气压组成) Z 为位置水头。

当降雨开始以后,湿润下渗锋面以定常速度向下移动,其移动速度与降雨强度成比例。在下渗到一定程度时,湿润锋面构成一道足以阻止土壤中的空气逸出时,被封存在土壤中的空气开始受到压缩。从图中可以看出,总压力水头是由土壤空气压和土壤水压两部分组成的。在空气未受到压缩时,总压力水头是由土壤水的张压引起的。在空气受到压缩时,尽管总压力水头还是持续增大,土壤空气压的部分也在增大,土壤水引起的压力却减少了,这说

明原来在土壤中的水被压出。当降雨持续到40分左右,构成毛细管的压力平衡崩溃,开始出流。出流量在60分达到最大值。此后,降雨停止,流量逐渐减少,总压力水头中的空气压的部分也在减少。总压力水头的变小,变化变缓。但是,当80分以后,流量又逐渐增大(图中A点),这时的总压力水源只由土壤水引起,湿润锋面已到达非饱和毛细管带的上缘,并通过它和饱和带联成一片,这样水就能连续地供给饱和带,从而使在一段时间内维持一定的出流流量。同样,在出现积水的情况下也观察到类似的现象。

从这个实验结果可以说明,为什么流域在没有地表流的条件下,也能在充分短的时间内出现地下水位的上升和快速出流现象。类似的现象在野外也被观测到(安原等1985)。

四、讨论与结论

森林生态系包含森林植物和森林土壤,在该系统内水、有机和无机物质不断地进行循环。弄清水循环和物质循环在森林生态系的作用是水分学和林学的基础研究课题。在解决物质迁移的问题中,首先必须弄清水的流动、转换过程的机制。

在降雨出流过程中,下渗和土壤中的快速流是非常重要的部分,在整个出流过程中地下水和土壤快速流所占的比例是相当大的,而地表出流所占的比例是比较小的。一般说来,森林流域的下渗能力是十分大的,森林的贮水能力也是很可观的。这些就决定了森林流域的产流不是霍顿产流,也不同于现在流行的许多产流理论和模式。许多野外观测结果表明,当森林流域出现产流时,并非全流域同时饱和才形成产流,而只是部分流域出现饱和就发生产流。这些产流区主要位于山坡坡面的下部及河流附近的地方。形成产流区时的特点是地下水

位或被地下水支持的饱和毛细管带上升到地表面附近使该区发生饱和,因而产生以及维持这种饱和状态所需的垂直下渗和地中水的侧向补给是流域是否发生产流的先决条件之一。地表流的产生可认为是在山坡坡面上部原来贮藏的水或下渗的水通过土壤向山坡坡面下部流动过程中由于下部已处于饱和状态而被迫重新出露地表的“回归流”。根据国外的研究表明,地表流发生的饱和面积为流域面积全体的10%以下,一般只为1~5%,而且,这种饱和产流区总是位于河道附近地区,其面积的大小随降雨的情况的变化而变化。

地下水通常在风化层的底部及与基岩交界上流动,但量不多。大部分的水滞留在斜坡下

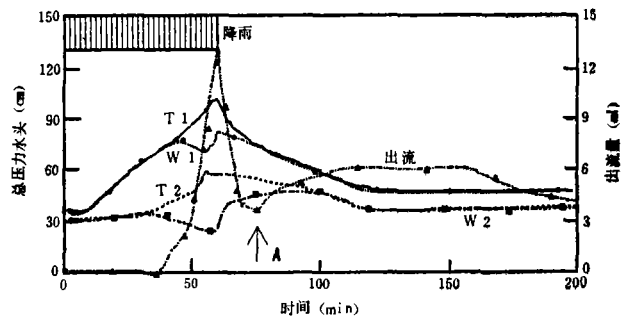


图4 降雨-出流实验结果(T和W分别代表总压力水头和土壤水负压;1和2分别代表从砂箱上端起算,深度为15cm和45cm的地方)

The results of rain-runoff simulation experiment. (T and W stand for the total potential and tension respectively, 1 and 2 stand for the depth of 15 cm and 45 cm from the top of the sand column.)

部。一这部分水在降雨期间被从斜坡上部渗透而来的水挤出，成为地下水出流量在水文过程线初期急速度上升的原因。随着降雨的持续，从斜坡上部补给的来水源源不断。饱和带也由斜坡下部向上部发展延伸。由斜坡上部及山谷两边的地下来水汇流于斜坡下部，这里的流量和流速都很大，其中管流起了比较大的作用。通常降雨下渗的水很大一部分都是通过管流排出斜坡。

此外，使用达西定律不能说明的地下水位迅速大升及地下水快速参加流域出流过程的问题，利用毛细管带中压力平衡及传递的原理可以得到回答。

综上所述，可得以结论。

1. 森林流域土壤的下渗一般比降雨强度大，森林截流作用也使流域内降雨分布发生时空的变化，减少了降雨强度，这样森林坡面全体出现霍顿产流是不可能的。
2. 降雨引起的产流中的重要部分是由降雨前蓄存在流域内的地中水贡献。
3. 在地下水位比较浅的河道附近地区，毛细管带上升到地表。只要地表有少量降雨，毛细管带马上变为正压，表现为地下水位的急速上升以及饱和面积的扩大，形成产流区。降雨过程中，土壤间隙中空气压力的变化也对毛细管带变为正压起到一定的作用。
4. 土壤中的大空隙的存在，给地中水的产流提供了通道，其作用不可低估。
5. 流域中森林的种类、大小、分布等因素对流域的结构构成（例如，树的闭郁度、大空隙的分布、根的分布，土壤渗透系数等）有很大的影响，进行影响森林流域中的水分运动和物质循环过程。

参 考 文 献

- 〔1〕 安原正也，丸井敦尚田中正，高山茂美・森林小流域におけるstormflowの形成に果たす地下水の役割。ハイドロロジー1985., Vol.15, No.2, 67-77.
- 〔2〕 Betson R P・What is watershed runoff? J.Geophys.Res.,1964・What is watershed runoff? J.Gecphys.Res.,1964・69, 1541-1552.
- 〔3〕 Dunne T, and Black R D An experimental investigation of runoff production in permeable soils,water Resour.Res., 1970a・6, 478-490.
- 〔4〕 Dunne T, and Black, R D,Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed,Water Resour.Res., 6, 1296-1311.
- 〔5〕 Freeze R A Role of subsurface flow in generating suce rnuoff, 2, Upstream source areas,Water Resonr.Res, 19728, 1272-1283.
- 〔6〕 Freeze R A,Streamflow generation,Rev.Geophys.Space phys197412.627-647.
- 〔7〕 Freeze R.A,and Cherry J A,Groundwater,Prentice Hall, Englewood Cliffs,N. J., 1979, 604p.
- 〔8〕 Gillhama P W.The capillary fringe and its effect on water table response,J. Hydrol., 1987, 67, 307-324
- 〔9〕 平田健正，村岡浩尔・森林域における物质循环と溪流水质（1），水文・水資源学1988年研究发表会要旨集1988・172-175.
- 〔10〕 平田健正，村岡浩尔，唐常源・半導体压力センサーを用いた不飽和多孔体の压力及び空気

压の測定,日本土木学会利讲演会文集。1989。

- 〔11〕 Tanaka・T. The role of subsurface water exfiltration in soil erosion processes, IAHS Publ, 1982, No.137, 73-80.
- 〔12〕 唐常源, 新藤静夫・地下水位変動に伴テ毛管帯における物質の挙動について。筑波大学水理センター報告1985,第9号, 67-72。
- 〔13〕 唐常源, 田瀬則雄, 新藤静夫, 田中勝, 倉田文・灌漑の影響を受ける畑地の土壤水分の挙動。地下水学会誌、1987・第29巻、第2号 99-105。
- 〔14〕 田中正・水文学における同位体利用の研究動向——地中水の循環に関する研究を事例として。京都大学防災研究所年報1982, 25, B-2, 181-193
- 〔15〕 田中正, 安原王也, 酒井均・丘陵地源流域における流出現象と地中水の挙動。京都大学防災研究所年報1982, 25, B-2, 181-193。
- 〔16〕 新藤静夫等・谷头部斜面に発生する崩壊と地下水の挙動。文部省科学研究費自然災害特別研究、1982, 90。
- 〔17〕 新藤静夫, 唐常源・地下水位の変化に伴ウ不飽和帯における物質の挙動。文部省研究費一般研究(C) 課題番号60580197 1987, P9-27。
- 〔18〕 Weyman D R・Throughflow on hillslopes and its relation to the stream hydrograph, Bull. IASH, 1910. 15, 25-33。
- 〔19〕 Whipkey R Z. Subsurface stormflow from forested slopes, Bull. IASH, 1965. 10, 74-85。
- 〔20〕 Yasuhara N. Watershed response to a storm rainfall. Sci. Kept. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, Sect. A, 5. 1984-27。
- 〔22〕 佐藤正, 村上与助, 村井宏, 関川慶一郎・新しい型の山地浸透計による測定成績(第一報)。林業試験場研究報告, 1956, No. 83, 39-64。
- 〔22〕 佐藤正, 村上当助, 村井宏, 関川慶一郎・新しい型の山地浸透計による測定成績(第二報)。林業試験場研究報告1957, No. 99, 25-57。

THE MECHANISM OF STORMFLOW GENERATION IN THE SMALL FORESTED WATERSHED

Tang Changyuan

(Department of Geography, Zhongshan University)

Tatemasa HIRATA

(The National Institute for Environmental Studies, Japan)

kohji MURAOKA

(Department of Civil Engineering, Osaka University, Japan)

Subject terms: forested watershed, stormflow generation, subsurface water, capillary fringe

Abstract

The paper explains the role of precipitation, infiltration, subsurface water and surface water in the small forested watershed. The authors consider the infiltration and the rapid flow in soil were very important in stormflow generation processes, in, which the subsurface water contributed more than surface water did. Generally speaking, the infiltration rate and the capacity of water storage in forested watershed are very large, which implied the Horton's theory or other current models of stormflow generation do not work there. In the contribution area, the saturated state was resulted from the rising of groundwater or the development of saturated zone above the groundwater. Therefore, the generation and maintenance of the contribution area depended on the infiltration and lateral flow and the surface water could be considered as the "return flow". The quick response of the subsurface water discharge to the rainfall is considered to be caused by the break of an equilibrium of forces acting on air and water in the capillary fringe, that is, by the quick conversion of the tension-saturated capillary fringe into the pressure-saturated zone. The equilibrium of forces acting on water in the capillary fringe can be broken either by the increase of the pneumatic pressure of the entrapped air with successive rainfall or by the rainfall directly when the capillary fringe just near to the groundwater surface.