

论文分类

地理资源

生物生态

科技与发展

资源管理

商机在线

正在载入...

森林植被影响径流形成机制研

究进展

张志强¹, 王礼先¹, 余新晓¹, E.Klaghofer²

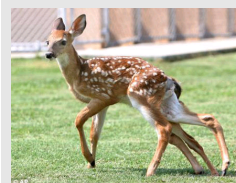
(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;
2. The Federal Institute of Land and Water
Management
Research, Petzenkirchen, A-3252 Austria)

提 要 径流形成机制研究在水文学领域中具有十分重要的意义, 且受到越来越广泛的重视。水文环境以及水文通量的空间异质性和时间变化性导致了水文过程的尺度依赖性和非线性特征, 没有对水文过程较为清晰的认识, 就不能将某一地区某一流域森林植被变化水文生态效应的研究结果简单地外推到其他地区和其他流域。开发基于物理过程分布式参数水文模型可以为认识森林植被变化的生态学后效和客观评价森林植被水文生态效益提供可行的工具。但是要实现这一目标, 研究森林植被影响径流形成机制是问题的核心所在。另一方面, 认识森林影响径流形成机制有助于研究水文学中的尺度问题。研究森林植被影响径流形成机制的主要方法包括水文测验、同位素示踪和动力水文学计算等, 研究的空间尺度则为坡面与流域相接合。从已有的研究成果来看, 森林植被影响径流形成机制可以概括为: ①森林流域径流形成成为变动源区产流机制; ②森林流域径流形成主要受饱和地表径流、亚表层径流和地下径流的控制; ③森林流域径流形成机制是相互作用和相互转化的; ④优先流在森林流域径流形成中起到了至关重要的作用。

关键词 森林植被变化; 径流形成机制; 水文模拟; 尺度问题; 同位素水文学; 优先流; 水力传导度

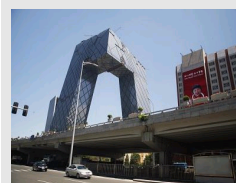
中图分类号 S715.3

图片新闻



美发现罕见畸形小鹿 6条腿2条尾巴
罕见畸形小鹿: 6条腿2条尾巴。美国乔治亚州埃弗雷特日

前发现了一只罕见畸形小鹿, 竟长着6条腿、2条尾巴。最先发现这只小鹿的...



央视新大楼落成
主建筑师库哈斯直面争议

库哈斯表示: “中央电视台新大楼, 无论你站在哪里, 从任何一个角度观看, 它都不一样。” 央视新大楼...

如何合理地利用流域森林资源,实现可持续发展目标是各国科学家努力研究的前沿课题。在森林植被与生态环境相互作用和相互影响中,水文过程是最为重要的方面,森林与水的关系问题是水文研究的中心议题之一。1967年在美国乔治亚大学召开国际森林水文学学术会议以后,森林水文学研究逐渐从传统的系统研究(system or watershed study)发展到系统研究与过程研究(processes study)相结合,从物理机制上认识森林的水文学作用,建立服务于森林植被经营管理的基于物理过程分布式参数水文模型的新阶段。在这一发展过程中,森林植被影响径流形成机制的研究是至关重要的一环。本文拟对森林植被影响径流形成机制的研究意义、研究方法以及主要的研究结论作一回顾。

1 森林植被影响流域径流形成机制研究意义

1.1 有助于客观评价森林植被的水文学作用

森林植被影响水文过程,促进降雨再分配、影响土壤水分运动、改变产流汇流条件,进而在一定程度上起到消减洪峰、增加枯水径流、控制土壤侵蚀、改善河水水质的作用。从国内外的研究来看,森林植被变化对河川径流的影响存在着不同的结论。从我国的情况看,具有代表性的观点是在北方地区森林植被覆盖率增加,流域产水量减少,在南方亚热带地区森林植被覆盖率增加,流域产水量增加^[1~3]。从国外的情况看,前苏联的专家持森林植被可以增加河川径流的观点;其他国家的大量研究成果表明,森林植被增加减少河川径流^[3~7]。无论是那一种观点,森林植被变化对流域产水量的影响幅度在不同水文生态区差别很大,即使在相同的水文区内不同的试验流域,这种差别也是很大的^[3,6]。因此,要想将一个地区森林植被水文生态效应研究结果可靠地外推到其他地区和其他流域,必须重视水文过程物理机制的研究,特别是要揭示森林植被对流域径流形成过程和不同径流成分的影响。此外,从我国林业生态工程建设效益评价的需求来看,这一研究在我国亦具有十分重要的现实意义。

1.2 有助于研究水文学中的尺度问题

尺度问题指在进行不同尺度之间信息传递(尺度转化)时所遇到的问题,是当今生态学、土壤学、气象学和水文学领域研究的重点问题和难点问题^[8~10]。从水文学尺度问题的形成来看有两方面的因素:第一为水文环境(流域水文条件)的空间异质性(spatial heterogeneity)和时间变化性(temporal variability)。如流域的地质条件、地形条件、土壤条件具有空间异质性,而植被以及流域前期储水特征等则不仅具有空间异质性,而且具有时间变化性。第二为水文通量的时空非恒定性(异质性)。如降水和流域蒸发散随时间和空间变化等。水文过程的异质性、尺度依赖性和非线性性构成水文学研究的前沿领域。

水文尺度通常指水文过程,水文观测或水文模型的特征时间或长度,水文尺度研究中最重要内容是径流形成过程与径流形成物理机制。例如,霍顿超渗产流是“点尺度”现象,即当降雨强度超过土壤入渗强度时,就可形成超渗产流,而饱和地表径流的形成只有在一定集水面积的土壤层饱和后才能形成,这种机制是一种“面尺度”现象和“体尺度”现象。再如,地表径流、土壤水分运动和地下水运动的时间尺度就不是一个数量级

(尺度)的问题。在森林环境条件下,由于枯枝落叶分解、植物根系展延、动物活动频繁等对流域土壤水文特征产生重要的影响,土壤水分运动中基质流与优先流的时间尺度也不是一个数量级^[11],同样坡面土壤水分垂直入渗运动与侧向流运动的时间尺度也不是一个数量级。研究森林植被对径流形成机制的影响,可以有助于我们选取较为恰当的观测尺度和模型尺度,将不同尺度的研究结果进行转换。

1.3 有助于开发基于物理过程的水文模型,为资源管理提供科学的决策工具

传统水文模拟一般是经过数据采集与分析→建立概念模型(描述主要的流域水文特征)→建立概念模型的数学表达式→采用数据系列的一部分进行模型参数的计算→采用剩余部分数据系列进行模型检验,如果计算的结果与实测结果不符,则需要重复上述的相关步骤,直到取得与观测数据一致的结果。这时就可以认为模型可被用于水文预测。这种方法建立在用于模型参数计算和用于模型检验的数据系列所处的水文环境是不变的这样一个基本假设的基础上^[12],然而水文环境随着人类对资源管理和利用而发生变化,即水文环境具有时空变异性,采用传统的工程水文学途径难以客观地评价森林植被变化的水文学后效。其原因有二:工程水文学途径往往要求有足够长的水文气象资料系列进行非确定性模型(随机过程模型)和/或集总式水文模型的参数率定,而一般地区又不具备这样的条件;另一方面,非确定性模型和集总式水文模型不足以揭示土地利用格局变化与森林变化对水文过程的影响。因此,开发基于物理学过程的分布式水文模型可以评价和预测土地利用变化、森林植被变化等对水文情势的影响;预测水文系统对具有空间变化特征的输入变量的输出特点;预测污染物质和泥沙的迁移;预测没有实测水文气象资料流域的水文情势;揭示森林景观异质性对于维护景观格局与过程影响机制。

从我国林业生态工程建设的实践来看,立地水平的造林技术开发和流域尺度的优化合理配置技术是两大关键问题,但流域尺度的优化配置如果离开基于土地利用的水文物理模型开发是难以做到的。基于物理学过程分布式水文模型的可靠性和精确度建立在对降水径流形成机制清晰认识上,只有这样才有可能将水文过程用具有物理意义的变量、参数、方程加以表达。因此可以认为,建立基于物理学过程分布式水文模型来为制定合理的森林经营规划、自然资源管理规划和土地利用规划提供依据的目标在客观上促进了森林流域径流形成机制的研究,水文模型的建立与流域径流形成机制研究是互相促进的。

2 径流形成机制及其影响因素

2.1 径流形成机制

径流形成机制是指降雨或融雪水通过坡面和流域蓄渗与汇流,最终在出口形成径流全过程的水分运动和传输物理机制。其内容大体包括以下几个方面:①暴雨径流的源区(空间分布);②暴雨径流的运动路径(汇);③暴雨径流的成分分割;④暴雨径流产生的时间问题(时间分布);⑤不同径流成分运动的物理表达。

2.2 流域暴雨径流形成与传输机制的影响因素

影响流域径流形成的因素是多种多样的,可以将其概括为降雨因素(水文通量因素)和流域因素(水文环境)。降雨因素包括降雨强度、持续时间和降雨量;流域因素包括地质、土

壤、地形和植被等因素，这些因素的综合作用影响了流域水分的贮存状况、不同界面层的水力传导度和水力坡度的变化，进而引起流域水分的水平和垂直运动而控制了流域径流的形成。地质因素在较大尺度上影响流域径流形成机制；从地形因素来看，一个流域可以概化为由 3 种基本地形单元即凸型、凹型和均匀坡面组成的系统，每一种坡面对超渗地表径流、饱和地表径流、亚表层径流的影响不同，同样由于坡型影响到坡面风化物质的厚度、饱和和亚表层径流、非降雨期土壤水分空间分布、森林植被的生长和水文单元的蒸发散等，从而影响径流形成机制^[13,14]；影响径流形成的土壤因素包括土层厚度、土壤孔隙状况、粒径组成、土壤成层性以及土壤中根系分布状况等。

3 森林影响径流形成机制研究方法

3.1 水文测验方法

水文测验方法研究径流形成机制是根据研究对象的具体特点，设计不同的测流设施对由不同路径进行传输的流量过程施测，从而确定不同径流成分在总径流中所占的相对重要性。从流域尺度上看，由于不同径流成分从坡面到流域的运动路径不同，因此其运动到流域出口的时间就不同，反应在流量过程线上则形成不同的形状，因此可以利用流域出口的流量过程线形状来判断不同的径流成分。但是，这种方法具有一定的局限性，在很多情况下难以准确地确定。

3.2 同位素水文学方法

它是利用已存在于水分子中的环境同位素，利用集水区水文系统中物理过程的变化（如蒸发、吸附与解吸附等）以及在水循环过程中各种水分的混合，引起同位素变化来研究流域径流形成机制的一种方法。采用同位素方法研究径流形成机制，一般仍需结合常规的水文测验手段来识别不同的径流成分。

3.3 动力水文学计算方法

动力水文学计算方法又称间接测定法，它是通过对坡面土壤水分和水势的动态连续测定，运用达系定律和连续方程计算土壤中垂直方向和侧向的水分运动通量，但此种方法仅适用于基质流。

在实践中，一般采用以上两种和三种方法相结合的途径来研究径流形成机制。在研究的空间尺度上，则为坡面尺度与流域尺度相结合，以流域尺度的研究验证坡面尺度的研究结果，以坡面尺度的研究从更深层次上揭示水分运动和传输机制^[15]。

4 森林影响流域径流形成机制研究的主要结论

传统水文学径流形成机制主要发展于二十世纪三、四十年代的 Horton 地表径流理论，这一理论在工程水文学领域的统治地位一直持续了大约 30 年，而谢尔曼单位线理论的建立进一步强化了霍顿产流概念。进入 20 世纪 60 年代末，变动产流面积概念的形成与提出对超渗地表径流形成机制的统治地位提出了强有力的挑战。Hewlett 和 Hibbert 基于森林环境下降雨强度很少能够超过入渗强度的实验观测提出了暴雨径流形成的动态理论框架，随后开展了大量的旨在探索暴雨径流形成机制的实验研究，在区域上以美国和欧洲的温带湿润区为主^[16]。70 年代变动产流面积广为接受，山坡水文学研究的兴起和迅猛发展——我国学者称之为“山坡水文学派”^[17]，为径流形成机制理论的形成奠定了基础。径流形成机

制研究手段越来越成熟，各种测流手段广泛采用[15、16、18、19、20]，特别是环境同位素的广泛应用[18、21、22]，各种径流成分的形成过程有了试验依据[18、23、24、25]，以水力传导度变化为核心的界面产流理论的提出[17、26]，对于研究和认识森林植被对流域径流形成机制的影响具有重要的意义。

4.1 森林流域径流形成受变动源区产流机制控制

如上所述，从经典的霍顿产流机制不能解释森林环境下径流的形成机制，相反，大量的研究成果表明森林环境下流域径流形成包括超渗地表径流、饱和地表径流、亚表层径流和地下径流。在森林环境下，降水通过林冠层渗入土壤中，沿坡面向坡下运动，在坡体下部形成饱和或近饱和层，水分通过亚表层径流流入河槽，形成暴雨径流。变动源区产流机制一般是指多种径流成分和径流机制并存，其空间分布则随时间而发生变化，在坡面尺度和流域尺度上都可以观测到这一现象[27]。在森林流域水文模型开发中则常采用描述饱和和区域空间分布的湿润指数来体现这一点[14]。在森林流域中建立集材道路系统，压实土壤，有利于超渗地表径流的形成，而随着降雨过程的持续，饱和带则有可能向上发展，从而为饱和和径流形成创造条件。从洪水过程形成变动产流面积在空间上的分布和传送过程看，某些流域产生较大的主要由亚表层径流形成的暴雨径流量表明暴雨产流并不仅仅局限于近河槽地段，而是可以扩展到流域内较大的区域上[28]。这与流域的地形特点（坡度、坡型、坡长等）、基岩走向、土壤水力传导性质、土层厚度及其空间分布特点、降雨过程等密切相关。

4.2 森林流域径流形成主要受饱和地表径流、亚表层径流和地下径流的控制

霍顿地表径流一般发生在植被稀少、土壤发育不良、土壤入渗能力低的条件下，在湿润地区的森林环境下，由于土壤发育，地表径流以饱和地表径流的形式产生。在森林环境下，亚表层暴雨径流可以对流域暴雨洪水过程的形成起到关键性的作用，是流域暴雨洪水过程的主要来源[29]。水文地球化学以及环境同位素示踪研究表明，在某些情况下地下水径流是森林流域洪水过程的主要来源[18、24、30、31]，暴雨洪水过程主要由被替换出来的“旧水” (Old water or pre-event water) 组成[30]。Sklash 和 Farvolden 在加拿大 Shield 森林流域的同位素示踪研究表明，暴雨洪峰流量主要由“旧水”组成，这一水文过程是由地下水分水机制 (groundwater ridging mechanism) 引起的[32]。Pearce 和 Sklash 等在新西兰西海岸的 Maimai 森林流域的研究表明，流域暴雨径流的 75%~97% 由“旧水”组成[23、30]。在其他温带湿润区的研究同样显示，暴雨径流过程主要由“旧水”组成[20]。

4.3 优先流在森林流域径流形成中起到了至关重要的作用

在森林环境下，降雨输入是如何替换出流域内储存的水分从而使旧水成为暴雨径流的主要来源？新西兰 Maimai 流域的研究表明，进入土壤中的新水在运动过程中与旧水快速混合，在近河槽的剖面上形成通过大孔隙和管道出流的旧水，对暴雨洪水径流的贡献可达 70%，并随土壤水分向坡下运动达到 100% [21、22、23]。Peters 等人对加拿大 Shield 森林流域通过采用水文测验、同位素和地球化学示踪等方法较为全面地研究了坡面壤中流水文过程及其对源头流域暴雨径流的贡献机制，结果表明在土壤—岩石界面较薄的风化层内都有壤中流流出，这一水流可以形成流域快速径流和洪峰流量，非达西流是森林土壤中主要的水分通量。同位素示踪研究表明，降雨从垂直方向渗透到土壤—岩

石界面后,沿岩石表面产生侧向流都是以优先流方式运动的,优先流在水平和垂直方向交互作用引起降雨的快速入渗致使土壤水分达到饱和,从而加大了新水和旧水沿坡面向下运动的通量[25]。也就是说,在旧水形成流域暴雨径流主要成分的这一过程中,优先流运动起到了至关重要的作用,基质流与优先流之间的交换对流域径流的形成也产生较大的影响[24、25]。

研究森林植被对流域径流形成机制的影响,必须将地质、地形、地貌因素的影响排除[34]。正是由于森林枯枝落叶分解、植物根系、动物活动频繁导致较大孔隙的优先流运动使得森林流域径流形成可以主要受地下水径流和/或亚表层径流的控制[11]。

4.4 森林流域径流形成机制是相互作用和相互转化的

大气可视为绝对透水层,大气和包气带界面之间水力传导度的差异是超渗地表径流形成的条件;包气带在垂直方向上水力传导度的差异(土壤导水率一般沿土层深度的增加呈减小的趋势)为侧向壤中流运动提供了条件;如果上层包气带随水分供给逐渐饱和,饱和带发展到地表,就为形成饱和地表径流提供了基本条件;同样,地下水水面亦可视为绝对不透水界面,当水分通过包气带抵达地下水水面,是地下水径流形成的基本条件[22、23]。从界面产流理论来看,在其他水文条件相同的情形下,由于森林植被的存在改变了水文系统的水力传导特征,随着流域储水量的变化,产流源区发生变化势必导致各种径流形成机制的相互作用和相互转化。

5 结语

流域径流形成机制的研究在水文学领域中具有十分重要的意义,且受到越来越广泛的重视。将有效降雨输入正确地分割为不同的径流成分是水文学模拟、溶质和污染物运移模拟以及流域水质评价的关键步骤。由于流域径流的生成和运动具有不同的路径和运动机制。森林环境下流域径流的形成受多种机制的综合作用,不同的径流成分在运动过程中互相交换和混合,优先流在其中发挥着十分重要的作用。研究森林植被对径流形成机制的影响,对于解决森林水文学中的尺度问题,实现不同尺度研究结果的信息转换,客观评价森林植被在不同时空尺度上的水文学作用,具有十分重要的意义。我国在这方面的研究较少,是今后森林水文学研究的重要方向之一。

参考文献

- 1 刘昌明,钟骏襄.黄土高原森林对年径流影响的初步分析[J].地理学报,1978,33(2):112~126
- 2 马雪华.四川米亚罗地区高山冷杉林水文作用的研究[J].林业科学,1987,23(3):253~265
- 3 王礼先,张志强.森林植被变化的水文生态效应研究进展[J].世界林业研究,1998,11(6):14~23
- 4 Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration [J]. J. Hydrol., 1982,55: 3~23.
- 5 Fahey Y, Rowe L K. Land use impacts [A]. Waters of New Zealand [C]. New Zealand: New Zealand Hydrological Society Inc.,

- 1992,265~284.
- 6 Stednick J D. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield [J]. *J. Hydrol.*, 1996,176: 79~95.
 - 7 Whitehead P G, Robinson M. Experimental basin studies—an international and historical perspective of forest impacts [J]. *J. Hydrol.*, 1993,145: 217~230.
 - 8 Bloeschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: A review [J]. *Hydrol. Processes*, 1995,9: 251~290.
 - 9 Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology [J]. *Ecology*, 1992,73(6): 1943~1967.
 - 10 Hillel D, Elrich D E. Scaling in soil physics: principles and applications [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990,25: 122~143.
 - 11 Jones A A. Pipeflow contributing areas and runoff response [J]. *Hydrol. Processes*, 1979,11: 35~41.
 - 12 Bergstroem S. Principles and confidence in hydrological modeling [J]. *Nordic Hydrol.*, 1991,22: 123~136.
 - 13 Tsukamoto Y, Ohta T. Runoff process on a steep forested slope [J]. *J. Hydrol.*,1998,102: 165~178.
 - 14 O'Loughlin E M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis [J]. *Water Resour. Res.*, 1986,22(5): 794~840.
 - 15 Atkinson T C. Techniques for measuring subsurface flow on hillslopes [A]. Kirkby M J. *Hillslope Hydrology* [C]. Chichester: Wiley, 1978,73~120.
 - 16 Bonell M. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests [J]. *J. Hydrol.*, 1993,150: 217~275.
 - 17 芮孝芳. 关于降雨产流机制的几个问题的探讨[J]. *水利学报*, 1996,(9): 22~26
 - 18 顾慰祖. 利用环境同位素及水文实验研究集水区产流方式[J]. *水利学报*, 1995,(5): 9~17
 - 19 Bonell M. Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale [J]. *J. Ameri. Water Resource Assoc.*, 1998,34(4): 765~785.
 - 20 Sklash M G. Environmental isotope studies of storm and snowmelt runoff generation [A]. M G Anderson, T P Burt. *Process Studies in Hillslope Hydrology* [C]. New York: John Wiley, 1990,401~436.

- 21 McDonnell J J. A rational for old water discharge through macropores in a steep humid catchment [J]. *Water Resour. Res.*, 1990,26: 2821~2832.
- 22 McDonnell J J, Stewart M K, Owens I F. Effects of catchment-scale subsurface mixing on stream isotopic response [J]. *Water Resour. Res.*, 1991,27: 3065~3073.
- 23 Pearce A J, Stewart M K, Sklash M G. Storm runoff generation in humid headwater catchments 1. Where does the water come from [J]. *Water Resour. Res.*, 1986,22: 1263~1272.
- 24 Pearce J. Streamflow generation processes: an Australian view [J]. *Water Resour. Res.*, 1990,26: 3037~3047.
- 25 Peters D L, Buttle J M, Tayler C H et al. Runoff production in a forested, shallow soil, Canadian Shield basin [J]. *Water Resour. Res.*, 1995,31: 1291~1304.
- 26 于维忠. 论流域产流[J]. *水利学报*, 1985,(2): 1~11
- 27 Troendle C A. Variable Source Area Models [A]. M G Anderson, T P Burt. *Hydrological Forecasting* [C]. London: A Wiley-Interscience Publication, 1985,347~404.
- 28 Sidle R C, Tsuboyamaet Y, Hosoda I, et al. Seasonal hydrological responses at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohata, Japan [J]. *J. Hydrol.*, 1995,168: 227~250.
- 29 Wilson G V, Luxmoore R J. Infiltration, Macroporosity, and Mesoporosity distribution on two forested watersheds [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988,52: 329~335.
- 30 Sklash M G, Stewart M K, Pearce A J. Storm runoff generation in humid headwater catchments: 2. A case study of hillslope and low-order stream response [J]. *Water Resour. Res.*, 1986,22: 1273~1282.
- 31 Tanaka T, Yasuhara M, Sakai H, et al. The Hachioji experimental basin study-storm runoff processes and the mechanism of its generation [J]. *J. Hydrol.*, 1988,102: 139~164.
- 32 Abdul A S, R W Gillham. Field studies of the effects of capillary fringe on streamflow generation [J]. *J. Hydrol.*, 1989,112: 1~18.
- 33 Stewart M K, J J McDonnell. Modelling baseflow soil water residence times from deuterium concentration [J]. *Water Resour. Res.*, 1991,27: 2682~2693.

34 Swanson R H. Forest hydrology issues for the 21st Century: A consultant's viewpoint [J]. J. Ameri. Water Resource Assoc., 1998,34(4): 755~763.

第一作者简介

张志强 (1967—), 男, 内蒙古人, 副教授, 博士, 主要从事森林水文、侵蚀控制和流域管理等方面的研究和教学工作。

* 国家自然科学基金资助重点项目 (39930130)。

新闻中心 | 环保法规 | 科技标准 | 环保知识 | 学术论文 | 商务平台 | 环保世纪行 | 绿色学校 | 公益广告 | 环保论坛
关于环境资源网 | 关于互联广大 | 网站地图 | 联系我们 | 客户服务 | 友情链接



版权所有 2007 中国环境资源网
京ICP证020289号
webmaster@ce65.cn



全国人大环境与资源保护委员会、中共中央宣传部、财政部、国土资源部、水利部、农业部、国家环保总局、国家广播电影电视总局、国家林业局、国家海洋局、全国总工会、共青团中央、全国妇联、中国科协 等十四个中央国家部委联合举办。

中華环保世纪行
世纪行