

1 森林植被变化对水文循环影响研究进展

森林与水的相互作用关系是水文学领域极为重要的研究内容，是水文研究的中心议题（Whitehead and Calder, 1993）。特别是随着人类对自身生存来自环境的压力与日俱增的认识逐渐加深，森林作为工业社会的主要材料来源之一的生态学后果的突现，使人们对森林与林业对人类生存与发展显示的重要作用产生了新的认识，使得林业经营与发展进入更为注重生态与社会效益的经营利用观（Franklin, 1989; Christensen et al., 1996; Hornbeck and Swank, 1992）。而森林生态效益的产生与其对生物地球化学循环动力、能量与介质、水文循环与大气循环的影响密切相关，揭示森林植被变化（森林采伐、森林火灾、开垦、造林等）对水文循环的影响过程与影响结果，可以为森林经营、流域管理、景观管理、自然保护、山地防灾、水资源利用和土地利用规划等提供科学依据。

森林变化对水文循环的影响应当包括森林采伐对流域水文循环的影响和森林恢复对流域水文循环的影响两个方面，而森林采伐和森林恢复必然伴随着森林生态系统内水文循环物理环境的相应变化。森林变化对流域蒸发散的影响，特别是对水文循环起决定性作用的流域土壤水文特性的影响是认识森林变化对水文循环影响的关键。森林对土壤水文特性的影响最终表现在土壤水力传导度的变化和水分传输路径的影响，而这种影响将直接导致流域径流形成的水文响应模式的变化，其中包括径流来源位置、地下水补给特征、径流产生机制、流域蒸发散的动力与补给机制等等。另一方面，地形、地质、土壤类型、植被等的空间变异性以及气象通量诸如降雨、入渗和蒸发等的时空变化性又进一步增加了认识和

定量描述森林流域径流形成机制和水文响应模式的难度 (Gupta and Mesa, 1988) .

森林水文研究显然可以分为 3 个相互关联的方面 : (1) 森林植被变化对水文循环量、质的影响 ; (2) 森林植被变化对水文循环机制的影响 , 主要是径流形成机制和化学物质传输机制 ; (3) 旨在为资源管理、工程建设提供基础的基于物理过程分布式参数模型的建立。三个方面的相互关系可由图 1.1 表示。

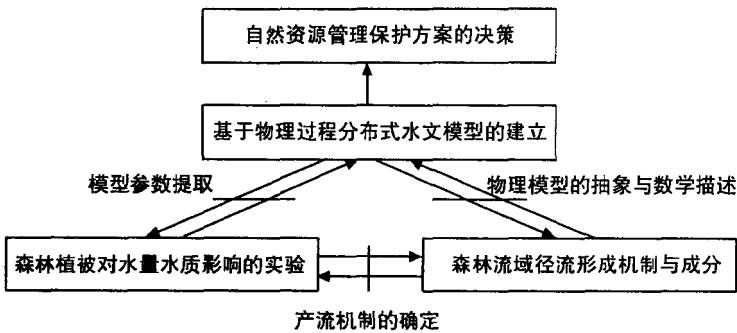


图 1.1 森林水文研究内容及其相互关系示意图

Fig.1.1 Relationships of forest hydrological research aspects

1.1 森林植被变化对水量的影响

1.1.1 流域系统研究 (Watershed/system study)

森林与水的关系的科学研究始于 20 世纪初 森林水文研究从

其早期发展阶段来看，主要集中在森林变化（主要是森林砍伐而不是造林）对流域产水量的影响。开始于 1900 年的瑞士 Emmental 山区两个小流域对比试验是这类研究的开端，也是现代实验森林水文学开端的标志。这类研究可称之为流域研究或系统（Basin/Watershed study）(Whitehead and Calder, 1993)。EMMENTAL 的流域对比实验包括两个流域：一个流域为森林流域，森林覆被率达 99%；另一个流域以草本为主，占 69%，森林占 31%。自 1927 年到 1956 年的观测资料表明，森林流域年径流量比以草本植物为主的流域小 11%，洪峰流量也较以草本为主流域低，50 次最大降雨洪峰流量森林流域为 $0.37\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ ，以草本植物为主流域为 $0.75\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ ，造成这一现象的原因是森林流域具有较大的土壤入渗能力和较慢的融雪速率。另外对 83 次流量过程的分析表明，森林流域具有较高的基流流量（McCulloch and Robinson, 1993）。尽管 EMMENTAL 的实验很难严格说两个小流域径流量的差异就是由于植被的不同所引起的，但对于确立山区森林保护和森林恢复具有良好效益的认识起到了积极的效果（Keller, 1988）。

美国开始于 1909 年的 Wagon Wheel Gap 的对比流域实验是严格意义上的对比流域实验，经过 8 年的校核观测后将其中一个流域的森林全部砍伐掉，又经过 7 年的对比观测实验，结果显示砍伐灌丛山杨和针叶树的 81 公顷流域每年大约增加产水量 30mm。从此以后，通过流域研究评价植被清除或植被类型变化对流域产水量的影响日渐增多（Meginnis, 1959; Burgy and Papazafiriou, 1971; Swank and Crossley, 1988; Johnson and Whitehead, 1993）。除对比流域实验外，流域自身对比法也被较为广泛采用，但流域自身对比由于难以将气候条件变化对流域产水量的影响从植被变化的影响中区分出来而影响评价的准确性。对比流域实验校核观测数据可以通过统计分析手段剔除土壤特性、地质地貌对评价森林影响流域产水量导致的误差（Johnson and Whitehead, 1993；

Swindel and Douglass, 1984; Hewlett (1971)。

对比流域实验研究森林植被变化对流域产水量的影响在美国于 1965 年左右达到了顶峰 (Stednick, 1996) 这一情形与当时对森林生态系统进行全面系统研究的需要 (Hornbeck and Swank, 1992) 相吻合。从研究的内容来看, 也从传统的森林植被变化对水量的影响研究扩展到水文循环过程以及与此相关的森林生物地球化学元素循环, 特别是养分循环的研究。尽管美国早在 20 世纪 80 年代就按照区域森林类型制定了旨在增加流域年产水量的森林经营, 主要为森林采伐指南 (Douglass, 1983; Har, 1983; Hibbert, 1983; Kattelman et al., 1983; Troendle, 1983; Troendle and Olsen, 1994), 但从世界各国的研究来看, 森林减少可以增加流域产水量以及造林可以减少流域产水量, 而森林植被变化对流域产水量的影响幅度却大相径庭。应当说这种差别对于客观正确地评价森林植被对水文循环的影响产生了不利的影响, 也迫使研究人员更加重视水文过程物理机制的研究, 以便于将对对比流域实验的研究结果可靠地外推到其他地区其他流域的水文响应 (Whitehead and Robinson, 1993) 为森林经营提供依据。

一般认为, 针叶林、硬木落叶林、灌木林、草本植物对流域产水量的影响呈递减趋势, 针叶林覆盖率变化 10% 将引起流域年总产水量约 40mm 的变化量, 同样硬木阔叶林覆盖率变化 10% 将引起流域年总产水量约 25mm 的变化量, 而灌木林或草本植物覆盖率变化 10% 将引起流域年总产水量约 10mm 的变化量 (Bosch and Hewlett, 1982)。在对比实验中森林覆盖率减少 20% 对流域产水量变化的影响难以用水文测验的方法来确定 (Bosch and Hewlett, 1982; Hetherington, 1987; Stednick, 1996)。

Stednick (1996) 将美国的 95 个流域实验进行了系统的总结, 他将流域位置、流域名称、流域面积、海拔高度、坡向、土壤类型、植被状况、年平均产水量、年平均降雨量、流域采伐面积比例、增加的流域产水量以及实验流域所处的水文区域进行了对比。在位于

Appalachian 山水文区的 29 个对比流域实验结果表明，在采伐 20% 的森林后才能观测到流域水量的增加，将实验流域的森林全部采伐流域年产水量的增加幅度在 0~400mm 以上 采伐面积每增加 10% 流域年产水量增加 28mm 在位于东部海岸平原水文区的 7 个对比流域实验中，采伐面积最少的为流域面积的 45% 结果增加流域年产水量 100mm 以上 全部采伐流域年产水量可增加 250mm 以上 每增加采伐面积 10% 流域年产水量可增加 18mm；在落基山 / 内陆山际水文区的研究结果显示，采伐面积达 15% 就可以观测到流域年产水量的增加，当采伐面积达到 50% 时 流域年产水量的增加幅度在 25~250mm 之间 采伐面积达到 100% 时 流域年产水量的增加幅度在 0~350mm 之间 当采伐面积超过 30% 时，产水量的增加幅度变化较大；在太平洋海岸水文区的 12 个对比研究数据表明 当森林采伐面积至少达到 25% 才可以观测到流域年产水量的增加 采伐面积为 82% 的流域年产水量增加值可达 615mm 另外的研究结果显示 100% 采伐可使流域年产水量增加 400~460mm，从线性回归模型可以看出，采伐面积每增加 10% 流域年产水量增加 50mm 在位于中部平原的对比研究表明，采伐面积达 100% 的情形下 流域年产水量增加幅度可以达到 306~752mm；在位于中塞拉省水文区的 2 个对比研究表明，减少 1.6% 的森林面积可以增加流域年产水量 6mm 清除流域 99% 的橡树疏林可使流域年产水量增加 154mm 此区域既有降雨也有降雪；在位于新英格兰和上湖州水文区主要以降雪为主，3 个对比实验结果为森林采伐 30% 可增加流域年产水量 500mm 而采伐面积占流域面积 100% 的另为两个研究结果却为流域年产水量增加 117mm 和 343mm。

导致不同水文区以及同一水文区森林采伐对流域产水量变化影响差异是由多种原因引起的 其中包括 采伐方式、气候条件、土壤地质条件、地形条件、水文测验在采伐后进行的时间等等。在其他因素都相同的条件下，森林采伐后降雨径流响应在很大程度依

赖于森林植被恢复的过程，在采取控制措施比如除草剂的使用来控制植被的恢复的情况下流域产水量增加的趋势将长期地持续下去。但当让植被进行自然恢复，流域产水量对森林砍伐的响应在降雨量大的地区变化较大 这些地区植被恢复速度快 持续的时间较短 因此 流域产水量增加的趋势在湿润地区通常在 3~10 年消失 (Hornbeck and Adams, et al, 1993) ，可以预料在较为干旱的地区 由于植被恢复速度较慢 流域产水量增加的趋势可望持续更长的时间，因为且流域产水量的变化是森林恢复或叶面积指数的函数 (Burt and Swank, 1992; Stednick, 1995) 较长时间的水文反应则与植被恢复的树种组成和气候变化有关 Hornbeck and Adams, et al, 1993)。森林采伐对流域年产水量增加和径流响应产生不同的影响亦可由森林采伐的自然空间位置而引起，因为这些位置对流域径流来源具有不同的影响 Bosch and Hewlett, 1982; Troendle and King, 1985; Stednick, 1995; Beven, 1985; Troendle, 1985) 不同采伐方式对流域产水量的影响最终亦归结到采伐面积对流域产水量的影响上，尽管不同采伐方式对流域森林将导致不同的影响。

前苏联水文气象站高设有 17 个径流量平衡站，集水区面积从 20~50km²。关于森林对河川流量的影响问题始终存在着 2 种截然相反的观点，B. N. Moiseev 根据前苏联的西北部和上伏尔加流域 100~1990km² 和 2000~20000km² 集水区的观测 提出森林对流域年产流量无明显影响，中等流域的森林覆盖率对年水产量影响显著 森林覆盖率每增加 10% 河川流量约递增 19mm/a 的结论。

在 1960 年之前，英国官方鼓励在水库上游流域进行造林以对水库进行保护 进入 60 年代后 英国在威尔士中部开展了 Plynilimon 流域试验 旨在对比森林流域与牧草流域的河川流量。他们的研究结论认为 森林流域的洪峰流量低于牧草流域 而在特大暴雨条件下二者没有显著的差别。森林流域的蒸发高于牧草流域。

近年来 他们又在北苏格兰的 Coalburn 流域建立了旨在研究针叶树种造林对水文循环影响的试验站,在苏格兰建立了 Balquhiddier 流域试验站,主要目的在于研究森林经营措施对水资源的影响。研究结果指出 森林植被可以减少产水量 因而采取短轮伐期的森林经营措施来减少森林对低水流的不利影响。

日本由于其特殊的地理环境 开展森林水文研究也较早,1923 年在茨城县太田试验流域集中进行了阔叶树皆伐对径流量影响的试验。1924 年在爱知县实验林场设置 4 个流域试验地 开始进行流域径流量随林相变化的比较试验以及不同树种林木蒸腾量的比较研究。他们的研究表明,森林采伐可增加直接径流 15% ~ 100%, 森林完全采伐年径流量增加 300mm 左右 此外 在采伐迹地特别干旱的条件下,由于降雨初损失大,可出现出流量小的现象。目前日本的森林水文研究尽管也开展降雨截留、蒸发散、下渗容量、地层中的重力水动态、地表径流等现象进行单项研究 但是集水区试验研究的重点在于进行采伐或造林对流域水文循环变化的影响进行综合研究。

在原西德的 100 多个测流流域属普通水文学范畴,主要为解决水资源管理服务的,服务于流域管理的研究项目包括植被变化和土地利用变化对水文循环的影响,内容包括溪流水量及其动态变化、溪流水化学特征以及地下水补给等方面。在许多测流森林流域中通过小区实验来获取定量评价水量平衡所需参数,其中包括林冠和枯枝落叶水分贮存和截流损失、积雪和融雪速率、水分通过土壤的渗漏、植被蒸腾根系吸水等。另一方面 严重的大气污染引起森林和水质退化使得水质研究受到了广泛的重视。通过流域自身对比研究结果表明,森林退化加剧可以引起生长季节流域产水量的增加 (Caspary, 1989)。在 UPPER HARZ 山脉从 1948 年开始的两个对比实验流域的结果表明, LANGE BRAMKE 流域的森林恢复减少年径流量 而 WINTERTAL 流域的森林采伐增加了年径流量 (Liebscher, 1972)。在 Krofdorf 森林水文研究站 采用了

校核观测的办法来剔除其他因素对森林采伐实验的影响，研究表明 分段采伐流域 96% 的山毛榉林，采伐后的第二年流域年产水量增加 86mm 比根据 10 年校核观测计算的流域产水量高出 39%，采伐实验对生物化学元素的输出没有显著的影响 Fuahrer and Huaser,1991)。

我国从 20 世纪 60 年代以后也开展了森林水文生态作用的集水区研究。流域面积从零点几平方千米到几千平方千米。研究的内容主要集中在探讨森林植被覆盖率变化与流域径流量变化的关系 其中包括植被盖度变化对年径流量及其季节分配、洪水量、洪水过程、径流组合变化等方面。

刘世荣等 (1996)对我国森林水文生态作用集水区研究做了比较全面细致的总结和对比。从地跨我国寒温带、温带、亚热带、热带的小集水区试验以及黄河流域、长江流域等较大集水区的研究结果来看 (周晓峰, 1994) 多数结论认为 森林覆盖率的减少会不同程度地增加河川年径流量。但是在四川省西部米亚罗高山林区、岷江上游冷杉林小集水区以及长江流域 4 对大流域的对比研究指出，森林流域年径流量较无林或少林流域大的结论 (马雪华, 1987、1993 黄礼隆等,1989)。马雪华 (1993)对长江流域和黄河流域森林影响年径流作用相反的结论 (刘昌明等,1978)作了如下解释 长江上游流域属高山深谷地貌 切割很深 气候湿润寒冷 林地总蒸散量较小 降雨强度不大而且分布较为均匀 因此 大面积的森林流域的年径流常常大于少林或无林流域的总径流量，显然采伐森林能促使年径流量略有增加，但是由于该区气候条件造成植被可以迅速恢复 径流量很快到原有水平。相反 地处黄河中上游的黄土高原地区属于半干旱地区 蒸发量大 林木生长势必引起蒸腾、蒸发量的增加 因此 森林流域的年径流量显著地小于少林或无林地区。

森林流域与无林或少林流域径流量随时间动态变化的研究，对于合理调节和利用水资源，确定合理的森林经营措施都是十分

重要的。国内多数研究得出较为一致的结论，但是也有相反的研究结果：①森林可以调节径流的分配 增加旱季枯水流量。但在黑龙江省松花江水系冀克图河上游陡嘴子河的天然阔叶林中进行的研究表明，森林覆盖率为枯水径流量呈显著的负相关关系 ②森林可以减少洪水流量、削弱洪峰流量，推迟或延长产汇流时间，但周光益等的研究结果认为，森林对洪水特性并无显著影响（周光益，1993）从森林对径流组分分配的影响看，皆伐使林地的地表径流增加 7.8% 壤中流增加 3.3% 总径流量 14.46% 而下渗流形成的径流减少 12.1% 周晓峰,1991)。在江西修水县大坑流域 2 个相邻小流域对比研究中，采用基流分割的办法对比了多林沟、少林沟快速径流、基流在不同月份的组成。其结果指出，在雨水充沛的 4~8 月 土壤较湿润 快速径流占降水量的比率 少林沟大于多林沟 且都比其他月份高 在 8~11 月 由于降水量及降雨日数少 蒸发量远大于降雨量 土壤干燥 径流形成少，一般无快速径流产生，多林沟的基流量要比少林沟高（孙阁等,1989）。同样 在海南岛的研究亦表明 由于森林的破坏 快速径流增加 基流量变小。

综观国内外的研究结果可以看出，世界范围内的森林流域水文实验研究已经相当多，这些流域处于不同的生物地理气候区内，研究的结果总的来看是森林砍伐增加流域年产水量，但是，在不同研究区域增加量具有极大的变化性，显然这是由于影响水文循环的环境异质性所引起的。

1.1.2 过程研究 (Processes study)

对森林水文而言，仅仅采用流域研究或系统研究的办法是没法将实验结果可靠地外推到其他流域的，因此从 20 世纪六七十年代起，更加注重森林水文过程研究。

(1) 林冠截流

林冠截流以及截持雨量的蒸发在森林生态系统水文循环和水

量平衡中占有极其重要的地位。林冠截流损失比灌木和草本截流损失大的原因有两个：一是林冠具有较大的截流容量；二是林冠具有较大的空气动力学阻力近而增加截持雨量的蒸发。国外一般认为温带针叶林林冠截流率在 20%~40% 之间 (Gash et al., 1980; Rutter et al., 1971; Teklehaimanot et al., 1991; Viville et al., 1993)。我国学者对地跨我国南北不同气候带及其相应的森林植被类型林冠截流率的分析研究表明，截流率变动范围在 11.4%~34.3% 变动系数 6.68%~55.05% 其中以亚热带西部高山常绿针叶林最大，亚热带山地长绿落叶阔叶混交林最小 (温远光、刘世荣, 1995)。

目前已有的林冠截流模型中 Rutter 模型 (Rutter et al., 1971, 1975) 和 Gash 解析模型 (Gash, 1979; Gash et al., 1980, 1995) 是较为完善和应用广泛的两个林冠截流模型。Rutter 模型在本质上是通过对林冠水量平衡和树干水量平衡动态方程的计算来获得林冠截流量的。林冠蒸发模型分饱和与非饱和两种情况，林冠饱和时蒸发量的计算采用 Penman-Monteith 方程并令冠层阻力为零，林冠未达饱和时林冠蒸发与林冠实际持水量和饱和持水量的比值成比例；林冠排水模型同样分林冠饱和和非饱和两种情况来计算；树干蒸发模型和树干径流模型采用与林冠一样的模型假设和模型结构。Gash 解析模型是基于 Rutter 模型概念结构的进一步简化，它根据降雨格局将林冠对降雨的截流与蒸发分为三个阶段：从降雨开始到林冠饱和为湿润期；饱和期；从降雨结束到林冠和树干彻底干燥为脱湿期。然后模型采用了一些较为简单的线性回归模型对 RUTTER 模型进行了简化。RUTTER 模型和 GASH 模型适用于相对密闭林分的林冠截流模拟，Valente et al. (1997) 对这两个模型进行了修正并较好地模拟了稀疏林冠的降雨截流过程。此外，Whelan and Anderson (1996) 将林冠截流的空间变化参数整合到一个简单的 Rutter 型模型中，对坡面尺度上挪威云杉人工林穿透降雨和林冠截流损失空间格局进行了较好的模拟。基于 Rutter 模

Lysmeter)

	20	60	
1988)			
1996)		1992, 1992	40% ~ 80%
82.2%			89.3%
	10.7%		

1.2

Abbott et al., 1986a)。

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，本节主要对森林流域径流形成机制研究进展作一回顾，森林流域水文模型研究进展将在下一节作进一步的回顾与讨论。

1.2.1 森林植被影响流域径流形成机制研究意义

(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（刘昌明、钟骏襄，1978；周晓峰，1991；孙立达、朱金兆等，1995）在南方亚热带地区森林植被覆盖率增加流域产水量增加（刘昌明、钟骏襄，1978；冯雪华，1987）。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（Bosch and Hewlett, 1982；孙阁，1987；Fahey and Rowe, 1992；Stednick, 1995, 1996；Whitehead and Robinson, 1993；）无论是哪一种观点，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（孙阁1987；Stednick, 1996；王礼先、张志强，1998）。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。

(2) 有助于研究水文学中的尺度问题

尺度问题是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 (Bloeschl and Sivapalan, 1995) 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, (Levin, 1992; Hillel and Elrick, 1990; Gupta et al., 1986)。水文学尺度问题是由于水文过程的时空异质性引起的, 而与尺度问题相关的就是水文过程的非线性问题。水文过程的异质性、尺度依赖性和非线性构成水文学研究的前沿领域。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、土壤条件具有空间变化异质性, 而植被特征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)。如降水随时间和空间的变化, 流域蒸发散随时间空间的变化等等。正是这种空间异质性和时间变化性, 导致了水文过程的尺度依赖性。

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, 特征长度与特征时间的比值称之为特征速度 (characteristic velocity) (Haltiner and Williams, 1980; Bloeschl et al., 1995; Bloeschl and Sivapalan, 1995)。过程尺度是指水文过程本身发生的特征时间和特征长度, 而观测尺度是指水文试验的空间和时间, 模型尺度则是指进行水文模拟的空间和时间尺度, 这三者是相互关联的。水文过程尺度研究最为重要的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

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（Jones, 1996）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（Warrick, 1998）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。当然，理想的状况就是观测尺度与模型尺度与相应水文过程尺度一致。但由于研究手段以及计算上的局限性，一般很难做到这一点。

(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（Mackay and Riley, 1991；O'Connell, 1991）这种方法建立在用于模型参数计算和用水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（Bergstroem, 1991），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（Abbott et al., 1986a, b）而一般地区又不具备这样的条件；另一方面 非确定性模型 随机过程模型 和 或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，开发与建立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（Beven and O'Connell, 1982; Moore, Norton and Williams, 1993; Running and Coughlan, 1988）。

从我国林业生态工程建设的实践来看，立地水平的造营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（Abbott et al., 1986a）。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。

1.2.2 影响径流形成的因素与径流形成机制

(1) 流域径流形成机制

径流形成机制是指降雨或融雪水通过坡面和流域蓄参与汇流，最终在出口形成径流的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) 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，可以将坡面分为三种基本单元即凸型坡面、凹型坡面和均匀坡面来考虑，而每一种坡面对超渗地表径流、饱和地表径流、亚表层径流、土壤水分的侧向运动的影响不同，由于坡型影响到坡面风化物质的厚度、饱和亚表层径流和非降雨期土壤水的空间分布以及森林植被的生长和与此相关的蒸发散等，从而影响径流形成机制（Tsukamoto and Ohta, 1988; Beven and Kirkby, 1979; O’Loughlin, 1986）。一个流域可以概化为由上述这三种坡型表述的系统；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。

1.2.3 森林影响径流形成机制研究方法

（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通过不同通道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，由于不同径流成份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。

（2）同位素水文学方法

采用同位素方法就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的物理过程的变化诸如蒸发、吸附与解吸附等，以及在水循环过程中的各种水分的混合，引起同位素的变化来研究流域径流形成机制。采用同位素方法研究径流形成机制，分割不同径流成分一般仍需结合常规的水文测验手段来识别。

（3）动力水文学计算方法