

# 森林与径流关系

## ——一致性和复杂性

魏晓华<sup>1</sup>, 李文华<sup>2</sup>, 周国逸<sup>3</sup>, 刘世荣<sup>4</sup>, 孙 阁<sup>5</sup>

(1.Earth and Environmental Science Department,University of British Columbia(Okanagan),3333 University Way,Kelowna BC V1V 1V7,Canada; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所,北京 100101; 3.中国科学院 华南植物园,广州 510650; 4.中国林业科学院,北京 100093; 5.Southern Global Change Program,USDA Forest Service,920 Main Campus Dr. Venture II,Suite 300,Raleigh,NC 27606,USA)

**摘要:** 论文综述国外近一个世纪以来在配对集水区研究方面所取得的结论,从水的自然属性出发,从森林变化对径流(年径流量、洪峰与枯水径流)的影响,径流响应的干扰临界值及水文恢复各方面探讨森林变化与径流关系的一致性与复杂性。森林变化与径流关系的一致性主要表现在由较长时间尺度表达的年径流量上。绝大多数的配对集水区的试验研究表明,采伐森林就会增加年径流量,而在荒地上造林就会减少年径流量。而由较短时间尺度表达的洪峰径流与枯水流量则呈现较大的复杂性和难预估性。综述表明,对径流特别是洪峰与枯水径流的定义及分析方法的不同也是造成森林与径流关系复杂性的重要原因。森林与径流关系的复杂性要求人们在研究及应用其关系时就必须有系统观,必须考虑植被、径流与其它过程(土壤变化、气候变化等)的相互作用。论文还认为尽管配对集水区试验作为一种研究方法为研究者提供了许多可靠的结论,但由于许多研究者只把集水区看作是“黑箱”,从而对认识森林与径流关系的复杂性有一定的局限性。未来的研究应把配对集水区的试验与其它对过程的研究技术(同位素、GIS 等技术)结合起来。

**关键词:** 森林变化; 年径流量; 洪峰径流; 枯水流量; 水文恢复

**中图分类号:** S715

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3037(2005)05-0761-10

## 1 引言

研究森林与径流的关系对造林或采伐规划、流域水资源管理、河流生物多样性及生境保护都有十分重要的作用。它还可帮助我们理解与评估河流形态的变化、泥沙的迁移及水灾与旱灾的规律。正因如此,许多国家对这一研究给予了相当的重视,特别是欧洲、美国、日本、南非和俄罗斯等国家和地区。早在 1909 年,在美国科罗拉多州南部的 Wagon Wheel Gap 建立了世界上第一个配对集水区试验。近一个世纪以来,虽然陆续建立了许多配对集水区试验并开展研究,但是由于森林与径流关系十分复杂,对此关系的认识虽有一定进展,但一直存有许多争议<sup>[1-6]</sup>。在中国,森林与径流关系的研究从 20 世纪 80 年代初黄秉维先生提出关于“森林的作用”的大讨论以来得到了较大的重视,有关部门在全国主要植被带建立了森林水文与生态定位站与观测基地。经过 20 多年的研究,取得了不少突破,但在一些关键问题上(森林与径流、森林与降水)仍存在较大的分歧<sup>[7-11]</sup>。虽然这些研究为评价森林与径流的关系奠定了一定的基础,对地区林业发展与规划起到了一定的指导意义,但必须看到它们的局限性。第

收稿日期:2005-01-30;修订日期:2005-03-24。

基金项目:中国国家重大基础科学项目(G2002CB111504);中国自然科学基金国家杰出青年基金项目(30125036)。

第一作者简介:魏晓华,E-mail:awei@ouc.bc.ca

一,中国幅员辽阔,植被气候与地貌组合的类型多且复杂,目前对有限类型的研究结果不能也不宜外推;其次,尽管配对集水区试验被广泛采纳为最可信的研究方法,但遗憾的是目前在中国建立起来的真正意义上的配对集水区设计与分析很少;最后,分析方法的不一致性及径流定义的多样化,例如,不同的研究者用不同的参数来表达洪峰,都限制了研究结果的可比较性与概括性。然而,森林与径流关系的研究在中国具有独特的战略指导性 & 实际可操作性。在中国,水资源总体严重贫乏及由人口增长及经济发展所驱动的水资源需求量的剧增,气候变化对水资源可能的影响以及主要流域生态系统存在的严峻问题及保护都需要从战略高度去认识森林与径流的关系。世界上还没有哪一个国家拥有像中国这样完整的气候植物带(从南方的热带雨林、季雨林、亚热带常绿阔叶林、温带针阔叶混交林至北方的寒温带针叶林)。这给中国在森林与水文关系研究方面创造了一个独特的机遇,使在国家范围内比较不同的植被气候带成为可能。

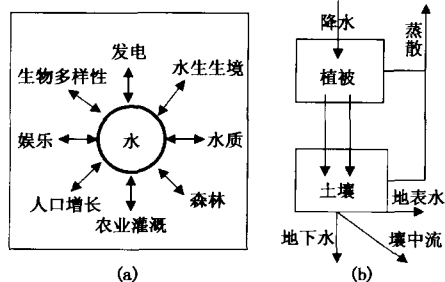


图1 水作为生态系统的联结纽带(a:水在自然社会经济大系统中,以加拿大 Nechako 流域为例;b:水在森林生态系统中)

Fig.1 Water as the ecosystem linkage and a need for the ecosystem perspective(a:water in the large natural-social-economic system using the Nechako basin,Canada as an example;b:water in the forest ecosystems)

水是物质,必须遵守水量平衡的法则。在森林生态系统中,水量平衡方程式是:降水量=蒸散+径流±土壤储水量的变化。在一年时间或较长时段内,可近似把土壤储水量的变化看作零。森林的变化(采伐或造林)会导致蒸散的变化,如果知道降水量,就可估测径流的变化。假定森林的变化(采伐或造林)不会改变降水,便可以推算采伐森林会增加年总径流量。反之,从裸地上营造森林就会减少年总径流,因为森林的年总蒸散总是大于裸地的。可以说水量平衡的法则是使森林与径流关系存有一致性的最根本的基础。然而,水不仅仅是一种物质,它在生态系统中又具有独特性。它的独特性在于它是生态系统的联结纽带。由于它的流动性(流经自然与社会系统许许多多的界面),它把生态系统中的许多功能过程连接在一起(从上游至下游,从自然到社会)(图1)。水的这种独特性至少有两方面的意义。第一,由于水文过程与许多其它生态系统相互作用,只要其中任何一个相互作用(如工业污染与水质)出现了生态问题,那么这个生态问题便会通过水的纽带特性转移到系统中其它功能过程,例如水质对人类及生物等;其二,由于水在系统中经过各种媒介及与其它过程相互作用,许多因素都可能影响水量与水质。这也意味着研究系统中水的过程必须要有系统观,即使在研究单一因素与水的关系时(如森林植被与径流),也必须认识到水与系统中其它过程都可能相互作用。这就是森林与径流关系的复杂性。可以说,这种复杂性是由于水的独特性所确定的。

本文的主要目的是综述目前国外在森林与径流方面的一些最新认识与观点,阐述森林与径流关系的一致性与复杂性,希望对中国森林水文的研究与应用有一些参考作用。具体回答以下几方面的问题:①森林对径流(年径流量、洪峰量及枯水量)的影响;②在一个流域内采伐多少(比例)才会引起径流的变化;③被改变的径流需要多长时间才能恢复(到干扰前的水平)。研究这些问题对指导林业与水资源管理与规划都有可操作性的指导意义。

应该强调一下,用于此综述的文献及研究都是基于配对集水区的试验。因此,有必要在此简述一下什么是配对集水区试验。配对集水区试验是选择2个在面积、形态、地质、气候与植被都近似的集水区,然后对它们同时观察一段时间,这段时间称为校正时段(一般3~5年,最好能够包括湿年和旱年)。在校正时段之后,可选择其中之一作为处理,保留另外一个不动或作为“参照”集水区。经过一段时间的观察,便可作统计分析来确定处理对径流的影响。需

应该强调一下,用于此综述的文献及研究都是基于配对集水区的试验。因此,有必要在此简述一下什么是配对集水区试验。配对集水区试验是选择2个在面积、形态、地质、气候与植被都近似的集水区,然后对它们同时观察一段时间,这段时间称为校正时段(一般3~5年,最好能够包括湿年和旱年)。在校正时段之后,可选择其中之一作为处理,保留另外一个不动或作为“参照”集水区。经过一段时间的观察,便可作统计分析来确定处理对径流的影响。需

要特别指出的是,在做配对集水区试验时一定要进行校正时段的观察。配对流域试验的优点是排除了观察期间的气候不同所造成的误差(这点是用单集水区所达不到的)及集水区之间的差异(这样就可以把处理对径流的影响分离出来)。然而,配对集水区试验只适合小集水区(100km<sup>2</sup>以下),文中引用的结果及讨论局限于小集水区森林与径流的关系。

## 2 径流的表达及意义

流域的河道径流呈现时间与空间的变化。在时间尺度上,有日变化、月变化及年变化。根据这个特征及社会的需要,常用不同的变量或参数来表达径流。最常见的径流变量是年径流量(或月径流量)、洪峰径流及枯水径流。不同的径流变量所包含的生态及社会经济意义是不一样的。年径流量或月径流量表达一个特定流域所具有的水资源量,而洪峰径流及枯水径流往往与可能的水灾与旱灾联系在一起,对生态与经济都有十分重要的意义。不论何种径流变量(年径流、洪峰径流及枯水径流),它的表达都与时间连在一起,只是长短不一。表达一个流域的水资源量的年(季节或月)径流量的时间较长,而用于表达洪峰径流的时间很短(如瞬时洪峰、最大日径流量),这是因为即使短暂的洪峰(几个小时甚至几十分钟)就可产生巨大的生态与经济影响。相对洪峰径流而言,用于表达枯水径流的时间要长一些(如最常用的7d枯水流量),这可能与一个系统对较低枯水流量或旱灾的承受时间长一些有关(与洪峰相比)。认识表达径流的时间尺度对理解森林变化与径流的关系有一定作用。一般来讲,由较长时间尺度表达的径流量(年径流量),具有较好的稳定性,它与森林变化的关系也易呈现一致性或可预估性。而由较短时间表达的径流量(洪峰径流)稳定性差,且受制于时间等因素,森林与径流的关系更易呈现复杂性。

## 3 森林与年径流量

自从1910年第一个Wagon Wheel Gap配对集水区建立以来,配对小集水区试验在欧洲、美国等发达国家和地区得到了广泛的发展,研究者也在不同阶段对研究的结果及时作了综述。Hibbert<sup>[12]</sup>对39个国家森林采伐与流域实验进行了综述。在增加54个配对集水小区后,Bosch和Hewlett<sup>[13]</sup>对94个配对集水小区作了总结。最近的综述<sup>[14]</sup>则包括137个实验集水区(其中115个采伐实验和22个造林实验)。尽管用于这3个综述的实验集水区数量不一,他们得出的结果是一致的。即:①采伐森林增加年径流量,营造森林减少年径流量;②径流的响应有很大的差异(从没有变化到数倍的变化)。这两个主要结论体现了森林与径流关系的一致性,可以用水量平衡的法则来解释。如果假设土壤储水量的年变化为零,而森林的变化也不会改变小集水区的降水,根据水量平衡方程,可以对森林变化与径流的关系作出定性的推断(径流增加或减少)。上面两个假设在一般情况下是可以满足的。然而,如果这些假设不成立,那么森林与年径流关系的一致性也就不成立。这是森林与年径流关系复杂性的一面。

(1)森林影响了降水量。根据Harr<sup>[14,15]</sup>在美国俄勒冈西部的研究,森林采伐后,年径流量减少。主要原因是森林能够截住大量的雾水,而且雾水的重要性超出了蒸散。这样采伐森林就大量减少了降水的输入,从而导致径流量减少。拥有这种特性的森林被称为“雾林”。Bruijnzeel<sup>[2]</sup>认为这种森林在中、南美洲较普遍,在亚洲的东南部及其它太平洋地区也可见。

(2)径流量变化在不同的季节呈现不同的规律。Hornbeck等<sup>[16]</sup>发现当考虑全年或生长期的径流时,森林采伐对径流有影响,但当只考虑休眠季节的径流时,森林采伐对径流几乎没有影响。这也许与休眠季节的蒸散少有关,因而采伐森林对该时段的径流影响不大。另外,在该时段内,假设土壤储水的变化为零也有误差,难以成立。

## 4 森林与洪峰径流

森林变化对洪峰径流的关系比较复杂(远复杂于森林变化与年径流的关系)。经过一个世

纪的森林水文的研究,可以说在森林采伐对洪峰径流的影响上几乎各种结论并存(有正影响、无影响和负影响),而且影响的范围或差异非常大(远大于对年径流量影响的差异)。

#### 4.1 采伐增加洪峰径流

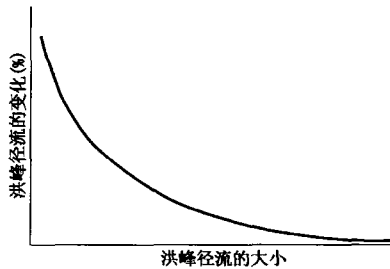


图2 森林变化对洪峰径流的影响与洪峰径流大小的一般关系

Fig.2 The relationship between peak flow sizes and peak flow changes

大部分研究表明,森林采伐增加洪峰径流(例如,Burton<sup>[17]</sup>;Lavabre,et al.<sup>[18]</sup>;Swank,et al.<sup>[19]</sup>),但这种影响与洪峰径流的大小有关(图2)。一般来讲,森林采伐对小洪峰径流增加较大,但对大洪峰径流影响(例如,10年一遇或者更高的)有限,甚至没有影响<sup>[3,5]</sup>。这主要是因为在大暴雨情况下,土壤与植被没有额外的储存能力,从而使大部分降雨转换成径流。这个结论很重要,因为大洪峰径流变化是人们最关注的(与水灾有关),而它与森林变化的关系并不紧密。如果不区分大小洪峰对森林变化的影响,而笼统地讲采伐增加洪峰径流,这样就会夸大森林对大洪峰径流的作用,由此产生误导。

虽然森林采伐对大洪峰径流的作用有限这一结论被普遍接收,但也有一些例外情况。根据Macdonald和Stednick<sup>[20]</sup>的总结,美国在Wagon Wheel Gap(B basin 科罗拉多州)、Cadwell Creek I(麻省州)和Horse Creek(爱达荷州)的集水区研究就表明森林采伐对高洪峰径流具有更大的影响。

#### 4.2 采伐减少洪峰径流

根据Austin<sup>[5]</sup>对82种洪峰类型试验的综述,其中有5个属于采伐减少洪峰径流的。这种现象虽然并不普遍,但它与一般所期望的相反。Austin把这种结论解释为与产生这种径流的时间变化有关。在洪峰受降雪与融雪过程控制的地区,森林采伐导致融雪过程的变化及其空间分布也有可能引起洪峰径流的降低。例如,在加拿大大不列颠哥伦比亚南部Upper Pentiction配对集水区试验。当地的最高洪峰径流是由海拔较高(大于1000m)的融雪径流所产生。对这些集水区进行研究发现,采伐海拔较低的森林使该区段融雪径流产生更早,从而使整个集水区的融雪径流产生异步化,由此降低洪峰径流值<sup>①</sup>。Wei和Davidson<sup>[21]</sup>、Hornbeck等<sup>[16]</sup>及Harr和McCorison<sup>[22]</sup>也有些类似的结论。

#### 4.3 产生不同结论的主观原因

前面提到在森林变化与洪峰径流的关系上几乎各种结论共存,对此问题的争论也是不断。除了前面提到的被试验验证的客观因素外,下面几点也是造成对此问题混淆、争论的主要原因。

(1)许多研究在分析森林采伐对洪峰径流的关系时,没有区分洪峰径流的大小。也就是没有把洪峰径流的时间尺度考虑进去。这里的时间尺度是指一定洪峰再出现的概率或时间(如100年一遇还是10年一遇洪水)。没有这种尺度的定义,就难以理解洪峰径流变化对自然河流系统及社会经济系统的影响。

(2)不同的研究者使用不同的参数来定义洪峰径流。这些参数包括:瞬时洪峰、最大日洪峰、生长季洪峰径流、休眠季洪峰径流、暴雨径流等等。使用不同的定义造成难以对不同的研究结果进行比较。

(3)分析方法不同。例如,Jones和Grant<sup>[23,24]</sup>用统计分析方法对美国俄勒冈州H.J.Andrews实验林集水区的森林采伐洪峰流量进行分析,得出森林采伐在小流域和大流域可分别增加高达50%和100%的洪峰径流。后来Thomas和Megahan<sup>[25,26]</sup>用同样的数据,但采用不同的分析方法得出相当不同的结论。这也说明选择适当的分析方法是十分必要的。

① Personal communication with Dr.Winkler,Ministry of Forests,Kamloops,British Columbia,Canada.

(4)未能把其它有关的过程(如土壤物理与化学变化过程)考虑进去,许多研究表明,森林采伐后,由植被变化导致的土壤变化对洪峰径流出现的时间与量都有非常大的影响。

## 5 森林与枯水径流

在欧洲一些历史记载中常提到古代的观察:采伐森林使河流枯干。森林变化与枯水径流的关系也是一个长期以来一直争论较多的问题。早在 18 世纪中叶,人们就认为失去森林会使泉水与河流枯干<sup>[1]</sup>。后来这个说法被不断积累的科学研究所否定,即森林采伐会增加河流枯水径流<sup>[27,28]</sup>或者造林会减少枯水径流<sup>[28,29]</sup>。这个被绝大多数研究所证实的结果可以从水量平衡上得到解释,采伐森林,蒸(散)发减少,土壤湿度增加,由此枯水径流增加。根据 Austin<sup>[6]</sup>的综述,虽然绝大多数的研究都表明森林采伐会增加枯水径流,但仍有少数的研究结论相反。例如,在美国俄勒冈州的“雾林”中,森林采伐使相当一部分雾林丧失,从而使系统的降水输入减少,造成枯水径流减少<sup>[30,31]</sup>。根据 Bruijnzeel<sup>[2]</sup>的综述,当部分热带森林采伐后,由土壤、根系及枯枝落叶构成的“吸水海绵”可能丢失,从而导致枯水径流减少<sup>[32]</sup>。另一个有趣的例子是枯水径流的时间变化规律,Hicks 等<sup>[33]</sup>对俄勒冈州的两个集水区研究,发现其中一个集水区枯水径流在采伐后最初 8 年增加,然后减少,主要是由于需水量更高的河岸针叶林取代了阔叶林。Keppeler 和 Ziemer<sup>[34]</sup>也发现类似的规律,即夏季枯水径流在 10 年后呈现减少的趋势。

森林变化对植被径流的影响除了与植物变化(或者所引起的蒸(散)发变化)有关外,还取决于土壤的变化。因为枯水径流很大程度上来自于地下水。那么,森林采伐如果破坏了土壤对地下水的补给过程(如土壤因为水土流失而丧失土壤持水量或土壤被压紧而使下渗明显减少)就会直接影响枯水径流的大小。可以再设想一个极端的情况,如果一个集水区由于大量采伐引起严重的水土流失,以至于丢失了所有的土壤,那么,降下的雨就没有土壤下渗过程,绝大部分变成地表径流,这样的集水区枯水径流就非常少甚至没有,这说明对森林变化与枯水径流要有一个完整的认识,必须把植被变化及由植被变化所产生的土壤甚至气候变化综合起来进行考虑,只有这样才能真正理解森林变化与径流的关系。遗憾的是,绝大多数配对集水区研究基本上是把集水区看作为一个黑箱,只关注森林植被变化对集水区输出(径流)的影响,对其内部的土壤水文过程考虑不多或没有结合起来考察。

除此之外,就象对洪峰径流有许多的定义一样,对枯水径流也没有一个一致的表达方式。有的研究者用最低的日枯水径流值,有的用枯水月份或季节的平均值或 7d 平均最低径流等。而选择不同的定义,有可能得出截然不同的结论。比方说,森林采伐有可能使枯水期的总枯水径流量增加,从而得出采伐使枯水量增加的结论。但如果采伐造成严重的土壤压紧和渗透下降,而又用很短的时间尺度(瞬时或日最低的枯水流量)来定义枯水径流,就有可能得出森林破坏降低枯水径流的结论(图 3),也是使得河流干涸(短期)的原因。笔者认为,古代的观察(采伐使河流干枯)是有一定道理的,至少不是完全错误的。这样的例子在水土流失非常严重的中国江西赣南地区应该很多。但为什么几乎所有的配对集水区试验都得出采伐增加枯水径流呢?这里有两个原因:第一,用于配对试验的集水区所采用的处理都是经研究者设计的,对整个系统特别是土壤的破坏并不一定很大,而由此得出的结论并不能完全反映现实中森林

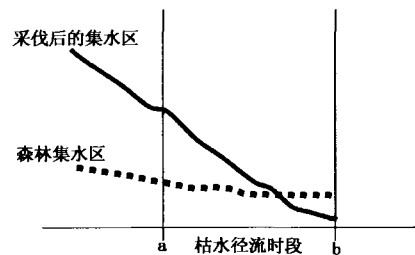


图 3 森林变化与枯水径流的关系与枯水径流的定义有关(如果枯水径流时段是 a-b,那么得出采伐使枯水量增加的结论;而如果枯水径流时段是 b 或接近 b,得出的结论就截然不同)

Fig.3 Importance of low flow definitions in affecting the relationship between forest changes and low flows (if the low flow duration is from a to b, the conclusion is that harvesting increases low flows; if the low flow duration is very short(at b or near b),the conclusion is opposite)

采伐的影响,现实中森林破坏当然包括一些极端破坏情况,特别是对土壤的破坏;第二,目前对枯水径流的普遍定义是基于相对长的时间尺度(枯水期与季节、7d 枯水量等),很少用最低日枯水径流量,而古代观察者往往记载的是一些不常见的现象(包括短暂的)。

## 6 径流响应的干扰临界值及水文的恢复

在一个集水区,采伐多少森林会引起径流的明显变化和由于采伐而改变的径流又需要多少时间才能恢复到没有干扰前的状态,都是非常重要的科学研究问题。这些问题对森林规划及流域管理具有现实的指导意义。例如,如果知道在一个森林生态系统中采伐 30% 的树木,就会引起流域洪峰等水文参数的明显变化,那么森林采伐强度就应控制在 30% 之内。如果知道一个森林生态系统受干扰后的恢复所需的时间及恢复所达到的状态,就可以根据集水区的水文需要制定森林恢复(包括树种改变)与流域水资源管理的具体措施。在讨论径流响应的干扰临界值及水文恢复之前,有必要先解释什么是森林集水区系统干扰,有哪些因素可能影响径流的变化及恢复。森林集水区的系统干扰是指人为采伐对整个系统各方面所产生的扰动。在森林采伐过程中,包括道路及排水管道的修建,采伐机器对树木的伐下,汇集及搬运车队对木材的运出等一系列操作过程。从干扰来讲,森林采伐不仅仅移走了森林树木,而且影响了土壤状况,特别是土壤被机器或其它工具紧压(影响土壤下渗)及道路的修筑,而土壤的变化及道路对森林径流下渗、汇集等过程都有十分重要的影响。如果把森林采伐仅仅看作是森林树木的搬走是片面的。遗憾的是,许多研究只把森林采伐与径流变化联系起来,而没有考虑由于森林采伐所引起的土壤甚至是气候的变化。换言之,没有把径流的变化与整个系统的总体干扰联系起来进行研究,这种研究肯定不能完全评估径流对采伐的响应。即使采伐的面积相等,如果没有一个对土壤被干扰的适当描述,难以对径流的响应作合理的比较。

径流对系统干扰的响应受许多因素的影响。从大的方面来讲,一方面取决于系统本身的属性,另一方面取决于干扰的程度与格局。系统本身的属性是由众多因素(包括气候、植被、地质、土壤、地貌等)所构成,它决定了一个特定森林集水区系统(如径流)对干扰的敏感度。例如,干旱森林生态系统的径流对干扰的响应就比湿润系统低。研究表明,在降水量少于 400mm 的地方,森林采伐对径流几乎没有影响<sup>[2]</sup>。在中国亚热带地区,坡度较高、以降雨为主的人工林系统中,它的径流(特别是洪峰)响应就极可能高于较干旱的中国西部的森林生态系统。径流对系统的响应直接受干扰程度的影响。一般来讲,采伐的比例越高,干扰的程度越大,对径流的影响也就越大(尽管不一定成正比的关系),需要恢复的时间也就越长。干扰(采伐)的部位(山的上部还是下部)和距河流的远近也有可能影响径流的响应。

### 6.1 径流响应的干扰临界值

不同的研究者根据不同的径流参数在不同的地方得出不同的结论。Bosch 和 Hewlett<sup>[13]</sup>认为一个森林集水区必须至少处理或干扰 12%~20% 才能引起径流的变化。MacDonald 等<sup>[20]</sup>也发现至少 10%~15% 是引起洪峰变化的临界值。Troendle 和 Leaf<sup>[35]</sup>、Troendle 等<sup>[36]</sup>认为 20%~30% 的集水区必须采伐才可以使径流出现统计上的明显变化。而 Baker<sup>[37]</sup>则定出较高的临界值 31%~33%。从这些研究结果来看,临界值的变化范围还是很大的(10%~35%)。这除了可能与特定集水区对干扰的敏感性不同有关以外,还与对系统干扰的描述不全面有关。大部分的研究只给出采伐的比例,而没有对土壤被干扰的情况进行适当的描述,也没有给出干扰的持续时间、作用方式等。

### 6.2 水文的恢复

前面提到,一个森林集水区在干扰后,水文恢复所需的时间取决于系统本身的恢复能力,也与干扰的程度(特别是土壤的干扰)密切相关。如果一个森林集水区出现由于采伐造成严重的水土流失或土壤下渗能力明显降低(由于紧压),水文的恢复要远远长于只经受植被的搬运、但土壤特性基本不变的集水区。水文的恢复也直接与植被恢复的快慢及相关的蒸散有

关。例如, Troendle 和 Nankervis<sup>[38]</sup>研究 Fool Creek 的 Sub-alpine 云杉集水区, 估计大约 60 年年径流量才可能恢复到干扰前的水平。他们推测, 在其它生长较快的植被类型的集水区(特别是 Aspen), 水文的恢复大概需要 15~45 年。在亚利桑那州的 Ponderosa pine 配对集水区的研究表明, 在完全采伐的集水区, 年径流恢复只需 7 年, 而在部分采伐的集水区, 其恢复则只需 3~7 年。而 Keppeler 和 Ziemer<sup>[34]</sup>在 Caspar Creek 实验林的研究发现, 大约 12 年左右, 径流基本恢复到采伐前的水平, 但是泥沙量还没有完全恢复。在一些情况下, 由于采伐后需水量大, 生长快的年轻植被取代了以前的成熟植被, 导致在一段时间后, 年径流量甚至低于采伐前的水平<sup>[39]</sup>。在美国东南大西洋海岸平原湿地地区, 由于地下水位很浅 (0~2m), 实际蒸散接近潜在蒸发力, 采伐湿地松林造成的水文影响更为短暂 (<5 年)<sup>[40-42]</sup>。

从这些研究结果可以看出, 水文恢复的时间也呈现出比径流响应的干扰临界值更大的变化。这是因为水文恢复的时间除了与干扰的特性有关以外, 还与系统恢复的内在能力有关。使用不同的水文参数作为恢复的衡量指标也是造成差异的原因之一。但一般来讲, 森林与水的作用关系的恢复或达到稳定要比森林结构的恢复快得多<sup>[43]</sup>。

上述径流响应的临界值与水文恢复的巨大变异性进一步说明了森林变化与径流关系的复杂性。反过来讲, 认识了森林变化与径流关系的复杂性, 也就不难理解径流响应与水文恢复各自所呈现的差异性及在很大程度上上的不可预估性。森林变化与径流关系的复杂性, 要求必须有系统观念, 必须把植被变化与径流及其它过程综合起来进行研究与分析。没有这种系统观, 就很难正确评价森林植被变化与径流关系的复杂性, 也就不可能真正理解植被与径流的内在关系。配对集水区实验具有很多的优点(前面已介绍), 但由于这种方法仍把集水区作为“黑箱”来研究, 对于分析森林变化与径流的复杂性仍有明显的缺陷。从研究森林植被变化与径流关系的复杂性来讲, 把配对集水区实验方法与一些过程研究技术(同位素技术、GIS 和分布式模型技术)相结合起来应该是未来研究的一个重要方向。

## 7 结论

水在森林生态系统中是一个重要的联结纽带。由于水的自然属性, 研究与应用森林变化与径流的关系, 客观上就需要有系统观, 需要综合地考虑植被、气候、土壤、干扰等各种影响。只有这样, 才有可能正确认识森林变化与径流关系的复杂性。

绝大多数配对集水区的试验研究表明, 采伐森林就会增加年径流量, 而在荒地上造林就会减少年径流量。但这种一致性的关系可能不适用下面两种情况: 其一是“雾水效应”很明显或“水平降水”在全年降水中占重要比例的地方, 由于采伐森林, 导致“雾水效应”“损失”, 从而使年径流量降低; 其二是尺度问题, 在一个大流域或地区 (>1 000km<sup>2</sup>), 森林的变化能否改变降水仍是一个重要的但还没有解决的研究课题。因此, 上面的一致性关系不宜外推到更大的尺度。

由于表达洪峰径流的时段较短(瞬时), 洪峰径流除了与森林植被变化有关外, 还与土壤变化、采伐的部位、洪峰产生的水文过程类型(降雨或融雪)、集水区的大小、洪峰产生过程的时间分布等有关。目前较一致的共识是, 森林变化对小洪峰径流有影响, 但对大洪峰径流(10 年一遇或更大的)影响有限, 甚至没有影响。森林对大洪峰径流的意义可能更多地在于森林对水土流失、水库与河道淤积的制约及对大洪峰径流形成时间与变化过程的调节。

一般认为森林采伐会增加枯水流量。但这种关系也具有复杂性, 由于枯水径流除了与植被变化有关外, 还与土壤变化(枯水径流与地下水的补给有密切关系)有关。然而大多数的研究(除了“雾水效应”的情况外)表明, 采伐(种植)森林, 就会增加(减少)枯水径流。森林变化与枯水径流的关系还可能与对枯水径流不同的定义有关。

确定径流对植被变化响应的干扰临界值对规划森林及流域管理具有现实的指导意义。临界值的变化范围一般在 15%~35%。对于敏感度较小的地区, 可取其上限(30%~35%), 而对

于敏感度较大的地区,可取其下限(15%~20%)。森林水文恢复所需的时间变化较大,因干扰的程度、系统恢复的内在能力、选择的水文参数等而异。

在研究森林与径流的关系方面,配对集水区实验是一种被广泛认可,但又是一种费时费钱的方法。中国在这方面虽作了许多努力,但由于缺乏严格的配对集水区的实验设计,从而使获得的结果有一定的局限性。鉴于研究森林与径流的关系(尤其是植被恢复对水资源的影响)在中国的重要性,建议应在每一典型植被带建立一组具有科学设计的配对集水区试验。同时,还应把配对集水区试验与其它研究具体过程(特别是土壤水文过程)的手段结合起来。这种方法上的结合有助于理解森林变化与径流关系的复杂性,也有助于弥补配对集水区实验方法的不足。

### 参考文献(References):

- [1] Andréassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 291: 1~27.
- [2] Bruijnzeel L A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the tree? [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 185~228.
- [3] MacDonald L H, Stednick J D. Forests and Water: A State-of-the-Art Review for Colorado[R]. CWRRRI Completion Report No. 196, 2003.
- [4] Vertessey R A, Zhang L, Dawes W R. Plantations, river flows and river salinity[J]. *Australian Forestry*, 2003, 66: 901~999.
- [5] Austin S A. Streamflow Response to Forest Management: A Meta-analysis Using Published Data and Flow Duration Curves [D]. M.S. Thesis. Fort Collins, Colorado, USA: Colorado State University, 1999.
- [6] Scott D F, Bruijnzeel L A, Mackensen J. The hydrological impacts of reforestation of grasslands, natural and degraded, and of degraded forests in the tropics [A]. In: Bonell M, Bruijnzeel L A. *Forest-Water-People in the Humid Tropics* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [7] Wei X, Liu S, Zhou G, et al. Hydrological processes in major Chinese forests[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(1): 63~75.
- [8] 李文华, 等. 森林生态系统水文生态功能综述[A]. 李文华. 森林的水文气候效应研究进展(之一)[C]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2001. 10~16. [LI Wen-hua, et al. Review on hydrological functions of forest ecosystems. In: LI Wen-hua. *Advanced Research on Forest Hydrology and Climate Effects*. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2001. 10~16.]
- [9] 陈军峰, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文的影响——对森林水文学研究中一些争论的探讨[A]. 李文华. 森林的水文气候效应研究进展(之一)[C]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2001. 119~126. [CHEN Jun-feng, LI Xiu-bin. The impact of forest change on the watershed hydrology—Discussing some controversies on forest hydrology. In: LI Wen-hua. *Advanced Research on Forest Hydrology and Climate Effects*. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2001. 119~126.]
- [10] 周晓峰, 等. 正确评价森林水文效应研究[A]. 李文华. 森林的水文气候效应研究进展(之一)[C]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2001. 35~40. [ZHOU Xiao-feng, et al. Rational evaluation of forest hydrological effects. In: LI Wen-hua. *Advanced Research on Forest Hydrology and Climate Effects*. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2001. 35~40.]
- [11] 刘世荣, 等. 中国森林生态系统水文生态功能 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1996. [LIU Shi-rong, et al. *Hydro-ecological Functions of Chinese Forests Ecosystems*. Beijing: China Forestry Publication House, 1996.]
- [12] Hibbert A R. Forest treatment effects on water yield[A]. In: Sopper W E, Lull H W. *Int. Symp. For. Hydrol* [C]. Pergamon Oxford, 1967. 813.
- [13] Bosch J M, Hewlett J L A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration[J]. *J. Hydrol.*, 1982, 55: 3~23.
- [14] Harr R D. Forest practices and streamflow in western Oregon[R]. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PNW-49. 1976. 18.
- [15] Harr R D. Streamflow after patch logging in small drainages within the Bull Run municipal watershed, Oregon[R]. Res. Pap.



- PNW-268,Pac.Northwest For.and Range Exp.St.,Portland,Oregon:U.S.Dep.Of Agric.,1980.
- [16] Hornbeck J W,C W Martin,C Eagar.Summary of water yield experiments at Hubbard Brooks Experimental Forest,New Hampshire[J].*Canadian Journal of Forest Research*,1997,27:2043~2052.
- [17] Burton T A.Effects of basin-scale timber harvest on water yield and peak streamflow[J].*J.Am.Water Resour.Assoc.*,1997,33:1187~1196.
- [18] Lavabre J,Sempere Torres D,Cernesson F.Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire[J].*Journal of Hydrology*,1993,142:273~299.
- [19] Swank W T,Swift L W,Douglas J E.Streamflow changes associated with forest cutting,species conversions,and natural disturbance[A].In:Swank W T,Crossley D A.*Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*[C].New York:Springer,1988.
- [20] MacDonald L H,Wohl E E,Madsen S W.Validation of water yield thresholds on the Kootenai National Forest(final report) [R].Fort Collins,USA:Colorado State University,1997.
- [21] Wei X,Davidson G W.Impacts of large scale timber harvesting on the hydrology of the Bowron River watershed[A].In: Mountains to Sea:Human Interaction with the Hydrological Cycle.Canadian Water Resource Association 51st Annual Conference Proceedings[C].Victoria,B C,1998.45~52.
- [22] Harr R D,F M McCorison.Initial effects of clear cut logging on size and timing of peak flows in a small watershed in western Oregon[J].*Water Resource Research*,1979,15:90~94.
- [23] Jones J A,Grant G E.Peak flow response to clear-cutting and roads in small and large basin,western Cascade,Oregon[J].*Water Resource Research*,1996,32(4):959~974.
- [24] Jones J A,Grant G E.Comments on "Peak flow response to clear-cutting and roads in small and large basin,western Cascade,Oregon:a second opinion"by R.B.Thomas and W.F.Megahan[J].*Water Resources Research*,2001,37(1):175~178.
- [25] Thomas R B,Megahan W F.Peak flow response to clear-cutting and roads in small and large basin,western Cascade, Oregon:a second opinion[J].*Water Resources Research*,1998,34(12):3393~3403.
- [26] Thomas R B,Megahan W F.Reply[J].*Water Resources Research*,2001,37(1):181~183.
- [27] Hibbert A R.Increases in streamflow after converting chaparral grass[J].*Water Resources Research*,1971,7:71~80.
- [28] Scott D F,Lesch W.Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *pinus petula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments,South African[J].*Journal of Hydrology*,1997,199:360~377.
- [29] McGuinness J L,Harrold L.Reforestation influences on small watershed streamflow[J].*Water Resources Research*,1971,7(4): 845~852.
- [30] Harr R D.Fog drip in the Bull Run municipal watershed,Oregon[J].*Water Resour.Bull.*,1982,18:785~788.
- [31] Ingwersen J B.Fog drip,water yield,and timber harvesting in the Bull Run municipal watershed,Oregon[J].*Water Resour.Res.*,1985, 21(3):469~473.
- [32] Hamilton L S,King P N.Tropical Forested Watersheds,Hydrologic and Soils Response to Major Uses or Conversions[M].Westview Press,Boulder,Co.,1983.168.
- [33] Hicks B J,Beschta R L,R D Harr.Long-term changes in streamflow following logging in western Oregon and associated fisheries implications[J].*Water Resources Bulletin*,1991,27(2):217~226.
- [34] Keppeler W T,Ziemer R R.Logging effects on streamflow:Water yield and summer low flows at Caspar Creek in northwestern California[J].*Water Resources Research*,1990,26:1669~1679.
- [35] Troendle C A,Leaf C F.Hydrology [A].In:An Approach to Water Resources Evaluation of Non-point Silvicultural Sources[C]. USEPA GOO/8/80-012,Environmental Research Lab.Athens,GA,1980.
- [36] Troendle C A,Wilcox M S,Bevenger G S,*et al.*The Coon Creek water yield augmentation project:implementation of timber harvesting technology to increase streamflow[J].*Forest Ecology and Management*,2001,143:179~187.
- [37] Baker M B Jr.Effects of ponderosa pine treatments on water yield in Arizona[J].*Water Resources Research*,1986,22:67~73.
- [38] Troendle C A,Nankervis J M.Estimating additional water yield from changes in management of national forests in the North Platte Basin[R].Report submitted to the US Bureau of Reclamation,Lakewood,Co.,2000.51.

- [39] Vertessey R A, Hatton T J, Benyon R J, et al. Long-term growth and water balance predictions for a mountain ash (*Eucalyptus regnans*) forest catchment subject to clear-felling and regeneration[J]. *Tree Physiology*, 1996, 16: 221~232.
- [40] Riekerk H. Influence of silvicultural practices on the hydrology of pine flatwoods in Florida[J]. *Water Resources Research*, 1989, 25: 713~719.
- [41] Sun G, Riekerk H, Comerford N B. Modeling the hydrologic impacts of forest harvesting on flatwoods[J]. *Journal of American Water Resources Association*, 1998, 34: 843~854.
- [42] Sun G, Riekerk H, Korhnak L V. Groundwater table rise after forest harvesting on cypress-pine flatwoods in Florida[J]. *Wetlands*, 2000, 20(1): 101~112.
- [43] 周国逸. 生态系统水热原理及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 1997. 30~45. [ZHOU Guo-yi. Principles of Ecosystem's Moisture and Heat with Application. Beijing: Meteorological Press, 1997. 30~45.]

## Forests and Streamflow—Consistence and Complexity

WEI Xiao-hua<sup>1</sup>, LI Wen-hua<sup>2</sup>, ZHOU Guo-yi<sup>3</sup>, LIU Shi-rong<sup>4</sup>, SUN Ge<sup>5</sup>

(1. Earth and Environmental Science Department, University of British Columbia (Okanagan), 3333 University Way, Kelowna BC V1V 1V7, Canada; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Botanical Garden of South China, CAS, Guangzhou 510650, China; 4. Chinese Academy of Forestry Science, Beijing 100093, China; 5. Southern Global Change Program, USDA Forest Service, 920 Main Campus Dr. Venture II, Suite 300, Raleigh, NC 27606, USA)

**Abstract:** Evaluation of the relationship between forest changes and streamflow has an important role in forest planning and water resource management. Although numerous studies on the subject have been conducted in various countries over the last century, controversies still exist. This is mainly due to the complexities of the relationship and the variations between the studied forest ecosystems. This paper examines both consistence and complexity of the forest-streamflow relations by reviewing the topics including the impacts of forest changes on streamflow, harvesting thresholds and hydrological recovery. The literatures used for this review are all from the paired watershed experiments. Our review shows that a consistent or predictable relationship generally exists when examining annual mean flow. The majority of the paired watershed studies demonstrated that harvesting increases annual mean flow, and reforestation from open land decreases it. The relationship between forest change and the short-duration hydrological variables such as peak and low flows appears more complex and less predictable. This is because many factors including changes in forest vegetation, soil condition, harvesting location, etc. interactively affect peak and low flows. Application of various definitions and analytical methods in streamflow also contributes to the complexities. We further conclude that a systematic approach considering interactions between streamflow and other processes or components (e.g. forest vegetation, soil and climate) is needed for understanding the forest-streamflow relation. The paired watershed approach is generally thought as a reliable method. However, it may offer limited use in evaluating complexity of the forest-streamflow relation if the paired watersheds are treated as the "black boxes". We suggest that combination of the paired watersheds with other process-related approaches should be used for studying the relationship between forest changes and streamflow in the future.

**Key words:** change of forest; annual runoff; peak flow; low flow; hydrological recovery