

# 森林流域蒸散发的控制要素与区域差异探讨

程根伟<sup>1</sup>, 陈桂蓉<sup>2</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 四川省水文水资源勘测局, 四川 成都 610015)

**摘 要:**森林蒸散发是影响河川径流的重要因素,但是森林影响蒸散发的机理和综合效应评价一直存在很大的分歧。本文从植物的光谱反射特征出发,分析了影响森林流域蒸散发的能量收支特征和水分的蒸发耗散关系,指出流域蒸散发的数值是由蒸发潜力和供水能力这两个因素的最小值决定的,并在此基础上提出了流域蒸散发计算的分布式模型。按照该模型,可以统一解释在湿润地区(南方)、干旱地区(北方)和半湿润地区森林变化前后的蒸散发差异,为森林蒸散发计算中长期存在的分歧提供了统一的理论解释和分析模式。

**关键词:**蒸散发;森林影响;分布式模型

**中图分类号:**Q948

**文献标识码:**A

森林水文学中最核心的问题为森林状态及其变化(结构、组成、砍伐、营造)对区域降水、蒸发、径流量、洪峰、枯水与水质的影响,它们都与林地水文循环的具体过程密切相关。由于地理气象条件与林地构成的复杂性,径流形成的环节十分复杂,水文循环具有不能重复不可控制的特点,仅从观测数据难以对森林结构的水文功能得出明确的结论。

森林水文效应评价中存在一个主要困难,即森林对流域蒸发(也即对总径流)产生正还是负的影响,存在很大的分歧<sup>[1-4]</sup>。不同的研究者,不同的试验区域,以及不同的观测方法都可导致极不相同的结论<sup>[5,6]</sup>,虽然每种结论都有自己的观测数据支持,但彼此却相互矛盾<sup>[7,8]</sup>。例如一种有代表性的方法是以林内气温和湿度来推算总蒸发量。根据野外观测,林内气温低于林外,而相对湿度高于林外。这样,一种观点断定林地蒸发小于荒地,因按道尔顿蒸发定律,气温低,空气接近饱和,都将抑制蒸散发的进行;而另一些人的结论正好相反,即林内气温低和湿度高都是强烈蒸腾的结果,蒸发消耗了大量潜热,同时散发的水汽又集聚林内,空气含水增加。这两种矛盾的结论都根据了林内气温低而相对湿度高这一观测事实,其差异在于前者将气温和湿度作为

事件的原因,而蒸发成为结果;后者视蒸发为因,温湿度为果,都能解释观测到的现象,但也都隐含着片面性。其实蒸发和温湿度之间存在相互影响、互为因果,任何单向的推论都与实际不合。但要同时考虑到它们的相互作用则又会陷入逻辑循环,这成为森林水文作用研究中的核心问题,需要进行深入的分析。

## 1 植被覆盖对能量平衡和蒸发的影响

从微观分析入手的传统的蒸散发计算在因果关系上陷入逻辑困难。研究蒸散发的正确途径应将流域视为一个整体,分清体系的边界和物质输入输出,从系统的能量和物质转化的角度去考察问题。运用系统工程的分析方法可以发现,只有脱离林地边界,进入外层大气之中的水分才能真正称为蒸散发损失,仅仅脱离植株但仍在林内滞留的水分则属于系统内部的水分转移,不能计入蒸发量。这样,只有穿过林地的气流中带走的水汽(动力作用)或靠热能蒸腾散发的水汽(热力作用)才对流域蒸散发有效。对小片树林,动力作用居首位,而对大尺度的林带,林地边界相对闭合,热力作用将占主导地位。

林地的辐射平衡是决定蒸散发潜能的关键。在

收稿日期(Received date):2003-10-20;改回日期(Accepted):2004-01-30。

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金项目(39930130)和中国科学院创新项目(KZCX2-SW-319)资助[Under the auspice of the Natural Science Foundation of China(39930130)and Knowledge Innovation Project of CAS(KZCX-SW-319).]

作者简介(Biography):程根伟(1956-),男,四川成都人,博士,研究员,主要从事水文学及森林生态研究,E-mail: gwcheng@imde.ac.cn [Cheng Genwei(Dr.)(1956-),Male,Research Prof.,Major in hydrology and forest ecology.]

气象因素不变的前提下,净辐射由地表覆盖物的反射系数决定。因此林地与裸地蒸散发的差异,归根结底是由二者的反射率来决定。反射率低,吸收能量多,可供蒸发的能量就大,蒸发能力强,反之则小。

仔细研究植物的反射光谱特征,我们发现,植物在可见光谱区的反射系数较小(约10%,与土壤的反射率相当),而在近红外光波段却存在反射率跃增,即从 $0.7\mu\text{m}$ 开始,植物的反射系数陡然增大到 $0.4\sim 0.6$ ,而且无论植物的种类和枝叶结构如何,都存在这种反射率的跃升,而水体、土壤或岩石则不具有这个特性<sup>[9]</sup>,见下图1、图2所示。

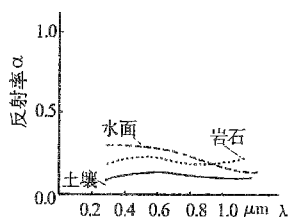


图1 野外土壤反射光谱

Fig.1 Reflecting spectrum of ground surface

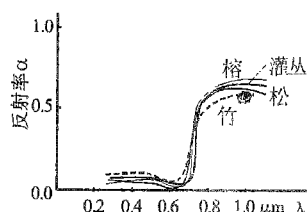


图2 野外林地反射光谱

Fig.2 Reflecting spectrum of forest canopy

可以认为植物在近红外光波段的高反射率是生物长期进化的结果。植物光合作用只能利用太阳光谱中的高能(短波)部分,低能(红外)光子达不到光合作用的量子阈值。而且红外光还有强烈的热效应,可引起植物体温升高,呼吸和异化代谢加强,不利于植物生长和营养物的积累。植物增大红外光反射率可有效地避免这种不利作用,获得最佳光能利用效益。

Penman H. L. 在1948年根据热量平衡和湍流扩散原理,在Bowen公式的基础上推导出了适合于水体表面的蒸发计算公式

$$EP = \frac{\Delta \cdot R_n + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma}$$

式中  $\Delta$  为饱和水汽压曲线的斜率,  $\gamma$  为与气压有关的常数,  $R_n$  为地面净辐射量,是地面(或水面)接收的总辐射  $R_0$  与反射辐射  $R_r$ , 以及地表长波辐射(热辐射)  $R_l$  之差,其中  $R_r$  与地面反射率  $\alpha$  有关,则

$$R_n = R_0 - R_r - R_l = R_0(1 - \alpha) - R_l$$

$E_a$  作为由于动力作用产生的水汽耗散项,它与风速和地面供水作用有关。根据彭曼公式,森林植被覆盖将增大地面反射率,减少地面净辐射  $R_n$  和热能收入,抑制地面蒸发潜力  $EP$ 。另外一方面,植

被覆盖增大地面蒸发面积和作用土壤深度,使得等效地面可供水量和空气动力项  $E_a$  增加,有利于蒸发的进行,总的蒸散发变化取决于  $EP$  和  $E_a$  两者的综合影响。

## 2 流域蒸散发计算的分布式模型

对于任何一个地区来说,当地的蒸发能力  $EP$  和地面的供水能力  $WM$  是有限的,实际蒸散发量  $Et$  是由这两者之中的最小值决定的,亦即

$$Et = k \cdot \min[EP, WM]$$

式中  $k$  是与地表覆盖条件有关的参数。

对于一个流域,各地的  $EP$  和  $WM$  并不完全相同,可以用流域面积  $F$  中的分布曲线  $EP(f)$  和  $WM(f)$  来表示,则实际蒸散发量  $Et$  也就是  $EP$  和  $WM$  分布曲线的下包线所包含的面积(图3),也即

$$Et = \int_0^F \left( \frac{k}{F} \right) \min[EP(f), WM(f)] df$$

$$Et = \int_0^{F_0} \left( \frac{k}{F} \right) WM(f) df + \int_{F_0}^F \left( \frac{k}{F} \right) EP(f) df$$

式中  $F_0$  是曲线  $EP(f)$  和  $WM(f)$  的交点所对应的相对流域面积。

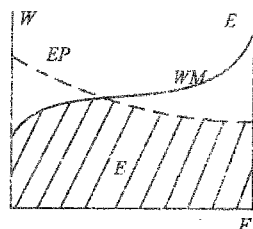


图3 流域蒸散发  $E$  示意

Fig.3 Distribution curves of watershed evapotranspiration

这里  $EP(f)$  和  $WM(f)$  的分布函数比较复杂,取决于流域地面土地覆盖类型的组合特点,它们可以是单调增曲线、单调减曲线或者是S型变化曲线,例如图3就是  $EP$  为单调下降曲线配合  $WM$  的S型单调增分布函数,但是无论为那种分布类型,流域实际蒸发  $Et$  都是这两分布曲线以下的公共面积积分。为了便于分析,也可以将蒸发能力分布和土壤水分容量分布概化为直线。

按照以上流域蒸散发分布模型,可以计算出各种植被条件下的流域蒸散发总量,得先不同植被对蒸散发的影响  $\Delta Et$  就是森林对蒸发能力的影响  $\Delta EP$  和森林对地面供水能力  $\Delta WM$  的影响之差。

下面就根据不同的气候条件分析流域蒸散发总量随植被变化的影响。

### 3 不同环境条件下蒸散发的变化

根据以上蒸散发的分布式模型,可以对不同气候环境和植被覆盖条件下的流域蒸散发进行计算,并对流域蒸散发上争论找到统一的理论解释<sup>[10,11]</sup>。

#### 1. 不同气候条件对蒸散发的影响

湿润地区:  $EP \ll WM, Et = k \cdot EP$

在湿润的南方主要是蒸散发能力(气候条件)决定流域的蒸散发量。

干旱地区:  $EP \gg WM, Et = k \cdot WM$

在干旱的北方主要是地面供水能力(地表水条件)决定流域蒸散发量。

这两种情况可以表示为图 4、图 5。

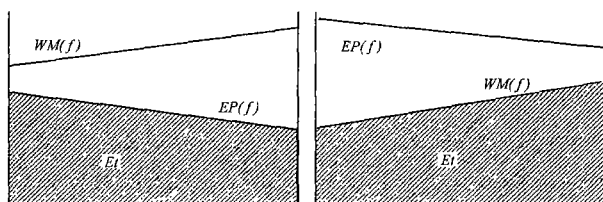


图 4 南方蒸散发的控制要素

Fig. 4 watershed evaporation distribution in wet region

图 5 北方蒸散发的控制要素

Fig. 5 watershed evaporation distribution in dry region

#### 2. 不同气候区造林对蒸散发的影响

对于南方(湿润地区)营造大面积的森林,将产生增大地面供水条件( $WM \uparrow$ )的作用。同时,由于森林具有较高的反射率,能量收入有所减少,因此导致蒸发能力下降( $EP \downarrow$ ),但是由于南方是蒸散发能力  $EP$  控制实际蒸发量,因此大片造林的结果可能减少流域中蒸散发量,导致径流的增加(图 6)。

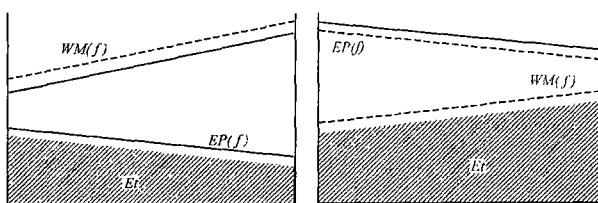
对于南方小片造林,由于它的面积不大,对辐射能量的影响很小,但是供水增加导致空气动力耗散项  $E_a$  增大,依然可能产生实际蒸散发增加的结果。

然而在西北(干旱地区)营造林带,虽然同样产生了增大  $WM$  和减少  $EP$  的环境变化效果,但是由于西北地区  $EP \gg WM$ ,是流域供水能力  $WM$  控制蒸散发量,因此造林将增大实际蒸发,导致径流量的减少,这种情况下的蒸散发变化模式见图 7。

对于中等湿润地区,  $WM$  和  $EP$  处于相近的水

平,因此造林后蒸散发的净变化要视  $\Delta EP$  和  $\Delta WM$  的相对变化结果才能确定,这样的情况就变得比较复杂,造林后既有可能产生蒸发的净增加,也有可能减少蒸发,还有可能保持基本不变,其各要素变化的情况参见图 8。

通过以上分析,可以发现,按照分布式蒸散发模型,营造同样的森林植被,在南方可能减少流域总蒸散发量,而在北方则会增加流域总蒸散发量,在半干旱地区则要视营林的面积和其他环境条件而定,有可能增加或减少蒸散发,而且造林的面积也具有重要的影响,这就比较圆满地解释了长期以来在这方面存在的矛盾结果。

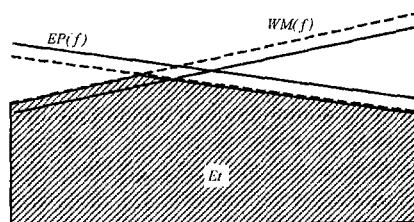


——造林之前 ——造林之后  
图 6 南方造林前后蒸散发的变化

Fig. 6 Evaporation variation with reforestation in wet region

——造林之前 ——造林之后  
图 7 北方造林前后蒸散发的变化

Fig. 7 Evaporation variation with reforestation in dry region



——造林之前 ——造林之后

图 8 半湿润地区造林前后蒸散发的变化

Fig. 8 Evaporation variation with reforestation in semi-wet region

### 4 小结

植物通过亿万年的进化,产生了有利的光合辐射能量利用特性,即植物叶片具有较高的红外光反射能力,这使得森林群落具有比岩土更低的能量收入,因此森林地区的蒸散发能力低于裸露地面。但植物的生理活动导致更高的水分供应能力,这两者的最小值决定了森林地区的实际蒸散发量。考虑到流域中  $EP$  和  $WM$  的空间分布,可以建立分布式的流域蒸散发模式,按照这种模式,比较圆满地解释了

在不同气候区域和不同植被环境下对森林水文影响流域蒸散发总量(也即总径流)的差异,即南方和北方、干旱与湿润地区、大规模或者小片造林产生的径流变化不一致,但是都符合流域面上的水分和能量相互作用规律,这为森林水文效应的定量评价提供了统一的理论依据。

### 参考文献(References):

- [1] Liu Changming. Initial Analysis of Forest Impacts on Annual Runoff in Loess Plateau[J]. *Journal of Geography*, 1978, 33(2), 112~126. [刘昌明. 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] Huang Bingwei. Precise Estimation to the Forest Effects[J]. *Geography knowledge*, 1981, (1), 1~3. [黄秉维. 确切估计森林的作用[J]. 地理知识, 1981, (1), 1~3.]
- [3] Huang Bingwei. Talking Again to the Forest Effects[J]. *Geography knowledge*, 1982, (2) 1~3, (3) 1~3, (4) 1~3. [黄秉维. 再谈森林的作用[J]. 地理知识, 1982, (2) 1~3, (3) 1~3, (4) 1~3.]
- [4] Li Changzhe. Guo Weidong, The Hydrological Effects of Forest[J]. *Ecology*, 1986, 5(5), 17~21. [李昌哲, 郭卫东. 森林植被的水文效应[J]. 生态学杂志, 1986, 5(5), 17~21.]
- [5] Li Wenhua, He Yongtao, Yang liwen. The Retrospection and Prospect to the Forest Impacts on Runoff[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5), 398~405. [李文华, 何永涛, 杨丽韞. 森林对径流影响的回顾与展望[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5), 398~405.]
- [6] Zhou Xiaofeng, Zhao Huixun, Shun Huizen. The Correct Evaluation of Forest Hydrology Effects[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5), 420~426. [周晓峰, 赵惠勋, 孙慧珍. 正确评价森林的水文效应[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5), 420~426.]
- [7] Cheng Genwei, Zhong Xianghuo, He Yucheng. The Paradox and Newly Acquaint with the Research in Forest Hydrology[J]. *Nature Explore*, 1996, 15(2), 81~85. [程根伟, 钟祥浩, 何毓成. 森林水文研究中的悖论及最新认识[J]. 大自然探索, 1996, 15(2), 81~85.]
- [8] [Cheng Genwei. Forest Change: the Hydrological Impacts of Upper Yangtze River Valley, Seminar for: Research for mountain area development[J]. *Ambio*, 1999, 28(5), 457~459.]
- [9] The Space Technology Center of CAS. The Dataset of Spectrum Information of Earth Resources in China. Beijing: Energy Source Press [M]. 1987. 22, 350, 814. [中科院空间科技中心, 中国地球资源光谱信息资料汇编[M]. 北京: 能源出版社, 1987. 22, 350, 814.]
- [10] Yu Jingjie. Liu Changming, The Research Summarization on the Forest Hydrology[J]. *Geography Research*, 1989, 8(1), 88~98. [于静洁, 刘昌明. 森林水文学研究综述[J]. 地理研究, 1989, 8(1), 88~98.]
- [11] Zhang Tianzhen. The Watershed Factors of Forest Impacts on River Stream[J]. *Journal of Natural Resources*, 1989, 4(1), 37~45. [张天曾. 森林影响河川径流的流域因素[J]. 自然资源学报, 1989, 4(1), 37~45.]

## Study on the Controlled Factors of Watershed Evapotranspiration and Its Regional Difference under the Effect of Forest Change

CHENG Genwei<sup>1</sup>, CHEN Guirong<sup>2</sup>

(1. Institute of Mt. Hazards & Environment, CAS, Chengdu, 610041, China;

(2. Hydrological Bureau of Sichuan Province, Chengdu, 610015, China)

**Abstract:** The evapotranspiration of forest watershed is a key factor impacting the stream flow. But its influence mechanics and evaluation principal are of big disagreement among researchers. Based on the characteristics analysis of plant's reflecting spectrum, the authors studies the energy income-outcome of forest watershed and its effect on the evapotranspiration. The research found that the evapotranspiration of a watershed depends upon the minimum value of potential evaporation and available water of ground surface. A distributed model of watershed evaporation is proposed based on the spatial distribution of these factors. The difference of evapotranspiration caused by reforestation in different climate condition can be explained by this model. This result provides a universal theoretical base and computation approaches to the forest watershed evapotranspiration calculation that has long disagreement.

**Key words:** watershed evapotranspiration; energy balance; distributed model