

森林间隙率模型及模型验证*

朱启疆 范韶华 刘来福

(北京师范大学环境科学系 北京 100875)

李小文 刘毅

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘要 植被冠层间隙率的研究至今已有 30 多年的历史。间隙率模型的研究一直沿着辐射传输方向及几何光学方向发展,本文试图将两者结合起来得到一个更为一般的间隙率模型。要验证模型,实验数据的获取是极其重要的,为了获得准确的数据,我们对观测进行了精心的设计,并在测量方法上有所创新,如“摄影法”,“平行光孔法”等都是经济而方便的方法。

关键词 间隙率、辐射传输,几何光学

1 概念与模型

概率间隙率: 一束光线不受阻碍地穿过冠层的概率。显然,概率值与光的入射方向,入射角度,冠层的空间结构,光线在冠层上的入射点,冠层的叶面积指数 LAI 和叶倾角分布 LAD 都密切相关,并且是这些变量的函数。

若太阳光以一定的入射方向 (θ, φ) 照射在一块区域 A 上(如一片果园),则对区域上有每一点 (x, y) ,都对应一间隙率值,即这一点为光斑的概率 $p(x, y)$ 。

记 $P_{gap}(x, y) = p(x, y)$, $\therefore A$ 上的整体概率间隙率为:

$$P_{gap} = \frac{1}{S(A)} \iint_{(x,y) \in A} p(x, y) dx dy \quad \text{此 } S(A) \text{ 为 } A \text{ 的面积。} \quad (1)$$

此积分值的意义为光线照到区域 A 上使某一点为光斑的概率的平均值。显然,它的大小反映了区域 A 上的林木分布的疏密程度,树叶生长的茂盛程度等。并且,由于它的值还随着太阳的入射的方位角和天顶角 (θ, φ) 变化,通过其中的变化关系可以得到林木空间结构的信息。

几何间隙率: (θ, ψ) 的太阳光照射到区域 A 上,定义 A 的另一个函数; $V(x, y)$

$$g_{gap}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{入射光不受阻碍地照射在}(x, y)\text{点上} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$g(x, y)$ 为点 (x, y) 的几何间隙率值。

而 A 上的整体几何间隙率为:

$$G_{gap} = \frac{1}{S(A)} \iint_{(x,y) \in A} g(x, y) dx dy \quad \text{此 } S(A) \text{ 为 } A \text{ 的面积。} \quad (2)$$

* 国家自然科学基金资助项目(49171052, 49331020)。

本研究得到中国科学院遥感应用研究所朱重光研究员,王锦地和郑柯同志的帮助,谨此致谢。

收稿日期: 1994年7月1日;收到修改稿日期: 1994年10月1日

它的几何意义为在太阳光以 (θ, φ) 角度照射在 A 上, 形成的光斑的面积与整个区域的面积之比, 显然, 它也可反映出树木的空间结构, 不过它忽视了多片树叶(或树干)挡住光线与一片树叶挡住光线的区别。故在反映树的茂密程度方面不如概率间隙率。

物理间隙率: 一束光穿过树冠到达点 (x, y) 时能量的保留程度, 称为点 (x, y) 上的能量间隙率。

$$e_{gap}(x, y) = E(x, y) / E_0 \quad (3)$$

(此 $E(x, y)$ 为 (x, y) 上的能量, E_0 为入射光入射前的能量值)

同理, A 上的整体物理间隙率为:

$$E_{gap} = \frac{1}{S(A)} \iint_{(x,y) \in A} e_{gap}(x, y) dx dy \quad \text{此 } S(A) \text{ 为 } A \text{ 的面积。} \quad (4)$$

由于能量透射到达 (x, y) 的程度显然与叶片的重叠程度密切相关, 故能量间隙率值中含有比几何间隙率更多的森林冠层空间结构的信息。同时由于它是个物理量, 可以进行实际测量, 故比每个点的概率间隙率更易获得和验证。物理间隙率值的获取是我们在四川的实验过程中最主要的工作。

Li-Strahler 模型:

由于整个冠层的空间分布结构直接影响区域的间隙率值, 近年来模型的发展既考虑了冠层个体的几何形状, 也考虑了个体的位置分布, 较有代表性的是 Li-Strahler 几何光学模型^[1,2]:

$$P_{gap} = p(0) + \sum_{n=1}^{\infty} p(n) \int_0^{\infty} p_i(s|1) \exp\left(-\frac{KL}{D}s\right) ds \quad (5)$$

这 P_{gap} 为整个区域上的整体间隙率 $p_i(s|1)$ 为给定方向入射光穿过单株时的路径长度 s 的分布密度函数, $p(n)$ 为一束光线穿过 n 个冠层到达地面的概率, L 为 LAI , D 为冠层的平均深度, K 为衰减系数。

2 模型的改进

Ishimaru 根据辐射能量与介质的相互作用的物理机制, 提出了辐射传输理论^[3], Kubelka-Munk 则在假设辐亮度的变化在植被的空间结构上只与冠层的深度相关下, 将辐射传输方程分解为由几个方程组成的方程组, 即 K-M 方程, 从理论上回答了辐射能量在介质中传播时的变化问题, 但根据此方程建立的间隙率模型往往没有考虑整个冠层的空间分布结构。

本文力图将辐射传输方程与几何光学模型结合起来, 在宏观上, 考虑植被的整体结构, 即树的位置分布, 树高值满足的概率分布, 树冠的形状等, 这样计算出来的 s 分布密度函数 $p(s)$, 可以运用于不连续冠层, 亦即用几何光学模型的思想, 能够处理由于植被不连续而引起的冠层的同一平面的介质的非均匀性。同时, 对每株树木个体, 不只是将它看成一个抽象的几何体, 而看成内部为均匀结构的可分层的个体, 直射能量和散射能量每经过一层“层”介质, 都会按照 K-M 方程中所描述的规律发生能量转换和衰减。

我们得到新的模型为:

$$\begin{aligned}
 E_{gop} &= P(0) + \sum_{n=1}^{\infty} P(n)q^n \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} P(n)q^n \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda Q / \sin \theta)^n \exp[-(\lambda Q / \sin \theta)]}{n!} q^n \\
 &= \exp[-\lambda Q(1 - q) / \sin \theta] \quad (6)
 \end{aligned}$$

此 q 为光线穿越单株树木的间隙率, λ 为样方单位面积内树木的株数, Q 为样方中所有树冠的沿与人射光线方位正交方向且过树干的垂直截面面积的均值。

3 实验数据的获取

为了验证模型以及比较物理间隙率(即能量间隙率), 几何间隙率和概率间隙率之异同, 找出它们之间的关系, 特别是研究如何应用卫星遥感来监测具有双层结构的云杉-冷杉林下的箭竹的生态与分布规律, 我们选择了四川省西北部的平武县王朗大熊猫自然保护区(海拔高度 2400m—3400m), 于 1990 年 5 月至 6 月对云杉-冷杉林进行了间隙率测量。

测量人员分成三个小组, 同时测样方的物理间隙率, 几何间隙率, 及地面参数。目的是能使间隙率数据和地面参数配套及比较两种间隙率的数据。

3.1 测量物理间隙率: 取 12 个不同的样方(面积 $10 \times 10\text{m}^2$), 对同一样方在同一时间(即太阳的入射角不发生变化)。我们均匀地取 96 个小面元(面积 $1 \times 1\text{m}^2$), 在每一小面元内用 SE-590 光谱仪测量这一区域中 8 个点的太阳入射能量的均值, 故对每一个样方的一个太阳角的测量, 我们得到 96 个太阳光线穿过冠层到达地面后的能量保留值, 再求这 96 个值的均值, 则得到了此样方在相应的太阳角下的物理间隙率值, 即模型(6)左边的 E_{gop} 值。

3.2 测量几何间隙率: 我们用了两种方法来测量样方的几何间隙率, 为了与物理间隙率相对照, 我们同时对同样的样方用测量物理间隙率时同样的太阳入射角来测量几何间隙率的值。

(1) 摄影法: 同样地, 在同一块样方均匀地取 13 个点, 将像机固定在三脚架上, 像机上再固定一罗盘, 控制像机的仰角和方位, 使得它与太阳的入射方向完全一致, 得到一有树叶, 树干及天空的像片, 对胶片作密度分割, 并对像片的畸变作变换校正, 可得到像片上的光斑的面积占这张胶片的比值, 我们把它作为这一“点”的几何间隙率的值。每一块样方的相应太阳角, 我们可得到 13 个值, 求其均值则得到这块样方的几何间隙率。可用此值来比较同一太阳角下的物理间隙率的值。这种方法的一个很大的缺点是像片的边沿有畸变, 使得像片上光斑的面积不能完全真实地反映实际光斑的大小。

(2) 平行光孔法: 我们用 10 根小竹管(长 20cm) 排成一条直线固定在一块小薄板上, 小竹管两头相通。我们用固定像机的方法将这个装置固定在三角架上, 配上罗盘, 调整好仰角与方位, 使竹管的方向与太阳光线的方向完全一致。然后在样方上随机地取

13 个点,在每一点上,我们对 10 个竹管逐个进行观测,若眼睛通过竹管看到的是太阳,则记值为 1,否则,若看到的是树叶或树干,则记为 0。这样,用这 10 个数相加再除以 10 则得一个 0—1 之间的值,我们把它当作这一样点的几何间隙率的值,同样对 13 个点的值求平均值便可得到整个样方的整体几何间隙率。由于条件的限制,不能做到真正足够小的孔,故用这种方法的弊端是常常会出现从竹管中看到一部分是树叶,而一部分是太阳光,此时不好确定它的值是 1 还是 0。如果对此装置进行改进,不是通过眼睛来看,而是在所有竹管的下端接光敏电阻元件,使其能直接读出它在树林下接收到的太阳的能量与太阳只穿过大气后到达地面能量的比值,则可成为一个很好的物理间隙率的测量装置。若可设计一能量阈值,使得当光敏电阻接收到的能量大于此阈值时,仪器的读数为 1,否则读数为 0,这样可很容易地得到样地的几何间隙率。

(3) 地面参数: a. 每块样方的树的种类,及每种树相应的株数。b. 每块样方的面积,坡度,海拔高度。c. 不同树种的树叶对太阳能量的衰减系数 k ,不同树种的树冠的近似几何形状(圆锥,球,椭球)。d. 每株树的高度,冠幅大小,枝下高。e. 单株树的间隙率值 q ,我们分别测量了云杉和冷杉两种树种,其测量方法与 Bryan J. Albers^[4]等所用的方法类似。

决定模型的一个重要参数是每株树冠的平均阴影面积 $Q/\sin\theta$,由于阴影重叠而造成的每棵树的阴影的边界无法确定,使得实际测量十分困难。故只能从树的其它参数和测量时的太阳位置来计算得到。

4 模型验证

4.1. 对大样方的检验

我们用 1990 年 6 月 22 日到 6 月 25 日在四川平武县自然保护区中的四个 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 的样方上获得的数据来验证,结果列表(表 1)如下:

表 1
Table 1

样方号	样方 1	样方 2	样方 3	样方 4
q	0.085	0.085	0.085	0.085
λ	0.0549	0.0549	0.0588	0.0588
Ω	19.98	19.98	24.33	24.33
θ	85°	61°	62°	45°
P_{gap}	0.3650	0.3173	0.2271	0.1571
间隙率实测值	0.3449	0.3017	0.2153	0.145
P_{gap} 与实测值的差异%	5.836	5.180	5.466	8.320

4.2. 几个模型的对照

我们将 4 个样方的地面数据分别代到新模型与其他两个主要的间隙率模型,下面是

几种主要间隙率模型的计算结果和实测间隙率的比较表(表 2):

表 2
Table 2

	样方 1	样方 2	样方 3	样方 4
新模型	0.3650	0.3173	0.22708	0.15707
L-S 模型	0.3664	0.3664	0.2701	0.2701
J-P 模型	0.1755	0.1755	0.1755	0.1755
实测值	0.34487	0.3017	0.2153	0.145

5 结论及结果分析

从上面建立模型的机理和方法可看到: 通过将辐射传输模型与几何光学模型相结合, 得到一更符合实际的不连续森林冠层的间隙率模型, 由于考虑了散射光对森林的物理间隙率的影响, 故使得测量不再必需有晴朗的天气, 而在阴天时也可以进行测量。

模型的验证结果表明, 对大样方的整体间隙率, 实验数据与模型计算结果吻合得很好, 说明对森林冠层整体分布和形状结构的考虑十分必要。

由于对物理间隙率的测量要求太阳光辐照度稳定, 所以测量时太阳周围不能有云。但四川地区很难有这样的天气, 这给实际测量带来很大的困难。结果 12 个样方的数据只有 4 个是在这样的条件下完成的, 对其它几个在太阳光不稳定或阴天的情况下所得到的数据有待进一步的分析和比较, 以找出其内在的联系。

还有很多工作需要进一步的深入, 如对样地坡度的考虑, 对用摄影法所测几何间隙率与物理间隙率值的比较, 以及更好地确定 K-M 方程的边界条件等。

参 考 文 献

- [1] Li Xiao Wen and Strahler. Modeling the Gap Probability of a Discontinuous Vegetation Canopy. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(2): 161—170.
- [2] 李小文, 朱启疆等. 地物二向性反射几何光学模型和观测的进展. 国土资源遥感, 1991, (1): 9—19.
- [3] Ishimaru, A., Wave Propagation and Scattering in Random Medium. Vol. 1, single scattering and transport theory, New York Academic Press, 1978.
- [4] Bryan J. Albers, Alan H. Strahler, Xiao Wen LI, etc. Radiometric Measurements of Gap Probability in Conifer Tree Canopies. Remote Sens. Environ., 1990, 34: 179—192.
- [5] J. E. Jackson and J. W. Palmer, A Transmission and Interception by Discontinuous Canopies, Ann. Bot., 1979, 44: 381—383.

A Model of the Forest Gap Probability and Its Validation

Zhu Qijiang, Fan Shaohua, Liu Laifu

(Beijing Normal University, Beijing 100875)

Li Xiaowen, Liu Yi

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract The research of the gap probability of forest canopy has been done for three decades. Two methods, radiative transfer and geometric optics, have been used separately in the research of modeling gap probability, and both lead to important results. This paper is focus on the combination of the two methods so as to develop a hybrid model. to check the new model, it is important to obtain experiment data, so we make the measurement carefully, and create some new ways for measurement, for example, "method of photography", "method of parallel light", which both are economical and convenient methods.

Key words Gap probability, Radiative transfer, Geometrical optic