

植物群体结构与太阳辐射的 垂直分布及其变化*

王信理** 李相玺***

(南京林业大学, 南京, 210037)

提 要

茶树、小麦和樟树群体叶面积垂直分布的差异显著,但在一定精度内,它们可用相同的函数形式描述,具有理论意义。茶叶叶倾角基本服从正态分布,方差较大。不同的植物群体中,太阳辐射的垂直分布有别,与群体叶面积垂直分布密切相关。光合有效辐射(PAR)的消光系数大于总辐射(TSR)的消光系数;一天中,群体下部的光照条件以中午前后为佳,消光系数(k)最小; k 值与太阳高度角的正弦成反比。考虑到 k 值的日变化,指数衰减律仍不失为一种简单实用的数学模型。

一、引 言

太阳辐射是植物生长发育的主要生态因子之一,也是植被微气候形成的主导因素。它在群体内部的传递过程与群体叶面积的空间分布密切相关。近年来,生态学、气象学、农学等学科对此作了大量深入的研究,从测试手段到数值模型皆有很大进展。在此基础上,本文引入描述不同群体叶面积垂直分布的函数形式,以茶园、小麦和樟树幼林为对象,探讨不同群体内部太阳辐射垂直分布的特征及其变化规律,得到一些有意义的结果。

二、试验与方法

1. 试验地概况

田间测试工作于1989和1990年在江苏省常熟市虞山林场(31°41' N, 120°42' E, 海拔20m)进行,以小麦、樟树、幼林和茶树为测试对象。茶园面积50ha,地势平坦。1981年直播

1991年6月17日收到,10月16日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。此项工作在导师熊文愈教授指导下完成。

** 现在中国气象科学研究院农气中心。

*** 现在江西省水土保持研究所。

鳩坑茶种,高 105—120cm,生长良好,已封行,冠顶呈平面状,叶层 20—25cm。樟树幼林面积 6.67ha,位于林场苗圃内。1980 年播种育苗,1981 年移床定植,株行距 1×1m。土壤肥沃,生长茂盛,叶冠浓密,冠与冠之间基本无空隙;树高 5.5—6.3m,冠长 2.8—3.0m,整个群体冠层顶部近平面状。小麦品种为扬麦早红,面积 20ha,1988 年秋季播种,长势旺盛,株高 70—90cm。

2. 仪器和方法

使用美国 LI-Cor 公司 LI-185B 型量子/辐射/光照仪和该公司 PY 和 PH 感应元件分别测定太阳总辐射(TSR)和光合有效辐射(PAR)。将感应元件依次通过各个高度,同时测定透射和反射辐射,三次重复求平均。

1989 年 4 月 15、16 日二天观测小麦群体中的太阳辐射,从地面开始至群体顶部,每 10cm 一个高度,天气晴,小麦处于孕穗后期。4 月 25、26 日在樟树幼林中观测,从枝下高至群体顶部,每 50cm 一个高度,地面作为一个高度,天气晴,中午前后少云。5 月 15 日和 1990 年 5 月 25 日观测茶园中的太阳辐射,从地面至群体顶部,每 10cm 一个高度,天气晴,中午前后少云。分析时以 5 月 15 日的资料为主。有云时,将观测时刻稍延以避免云的影响。观测从 6 时开始,18 时结束,每隔 2 小时一次,每次观测基本在 15 分钟内完成。

为求得各群体叶面积垂直分布特征,每个群体中太阳辐射观测结束后,于观测点周围,茶树分层剪取一行中 20cm 内的所有枝叶,小麦连续拔取一行中 10cm 的植株,各做三个重复,作为样本供分析;樟树伐三棵具有代表性的样株。小麦和茶树从地面开始,樟树从枝下高计起,用分层切割法测定群体叶面积垂直分布,同时考虑茎和枝的遮荫作用。然后,取三次重复(或三棵树)的平均值用于分析。小麦和茶树分层切割的层间距为 10cm,樟树的层间距是 50cm。1990 年 5 月 20 日,在茶树叶层内,随机选取 60 张叶,用量角器测定叶倾角,两个重复。

三、结果与分析

1. 叶面积垂直分布特征

如图 1 所示,茶树叶量的 90%集中在茶冠顶部 20cm 内;樟树叶片大多分布在冠层中部;小麦群体中,从下至上皆有一定数量的叶片生长。三种群体叶面积垂直分布的差异显著。

尽管各个群体的分布特征不同,计算结果表明,可用下述通用经验公式^[4]描述:

$$L(Z) = a_0 a(Z) \quad 1 \geq Z \geq 0 \quad (1a)$$

$$Z = z/HC \quad (1b)$$

$$a(Z) = a_m \frac{1-Z}{1-Z_m} e^{[\frac{1}{2}(Z_m-\lambda)^2 - \frac{1}{2}(Z-\lambda)^2]} \quad (1c)$$

$$Z_m = \begin{cases} (\lambda + 1 - \sqrt{(\lambda - 1)^2 + 4})/2 & \lambda > 1 \\ 0 & \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (1d)$$

其中, $L(Z)$ 代表 Z 高度上的叶面积密度, a_0 是群体叶面积指数, z 为实测高度, HC 是群体高度。分析可知, a_m 和 Z_m 分别表示叶面积密度最大值及其所在的相对高度。 λ 是经验参数, 由实测资料求得。 $a(Z)$ 表示叶面积相对分布密度函数, 满足归一化原则:

$$\int_0^1 a(Z) dZ = 1 \tag{2}$$

式(1)中, a_0 是实测值, λ , a_m 和 Z_m 的不同数值和约束关系形成了不同群体叶面积的垂直分布特征, 可称为群体叶面积垂直分布特征值。给定 λ 后, Z_m 和 a_m 分别可由式(1d)和式(2)求解, 因此, 只需选择适当方法求解 λ 即可。这里, 采用黄金分割法, 以对实测资料拟合的剩余方差为目标函数, 对 λ 作一维非线性搜索。各群体的拟合结果见图 1 中曲线, 有关参数和拟合误差列在表 1 中, 从中可见, 式(1)的拟合效果令人满意。拟合值与实测值的对比分析表明, 小麦和樟树群体各层次之间的误差分布比较均匀; 茶园中叶片主要分布层的

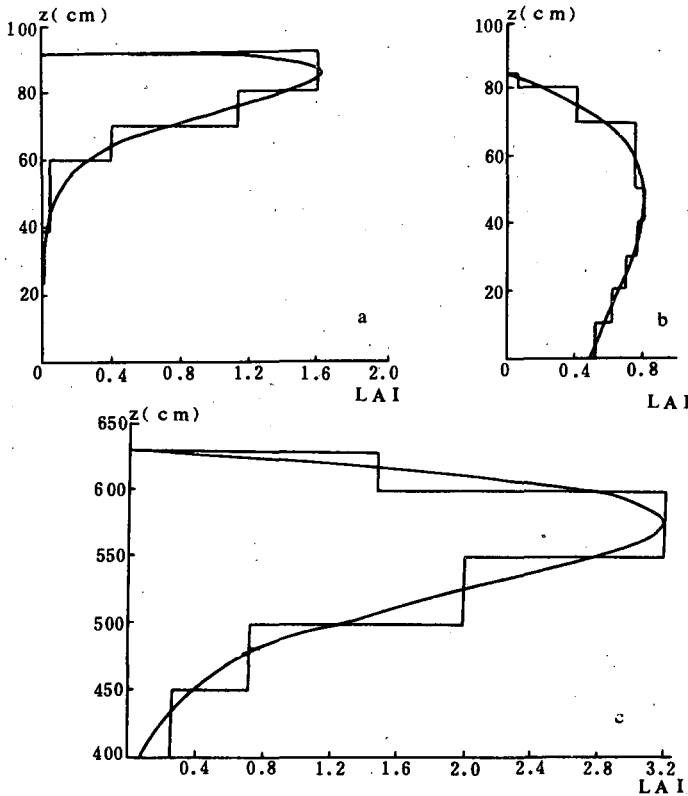


图 1 茶园(a)、小麦(b)和樟树(c)群体叶面积密度 (折合为各层中的叶面积指数)垂直分布

表 1 群体叶面积垂直分布特征值与拟合误差

| 特征值 | a_0 | a_m | Z_m | λ | $HC(\text{cm})$ | 误差(%) |
|-----|-------|-------|-------|-----------|-----------------|-------|
| 小麦 | 5.34 | 1.29 | 0.54 | 2.7 | 85 | 0.68 |
| 樟树 | 7.73 | 6.10 | 0.94 | 17.4 | 630 | 0.88 |
| 茶树 | 2.81 | 7.77 | 0.95 | 22.3 | 105 | 0.63 |

拟合效果很好, 相对误差在 0.2% 以下; 下层误差稍大, 因叶片分布极少, 其绝对差值并不

明显。

用 β -分布^[7]、多项式、幂函数、指数函数、三角形分布^[3,6]以及分段拟合^[1]等方法计算结果表明,总的拟合效果,式(1)最好。在描述群体叶面积垂直分布时,式(1)具有普遍意义。

2. 叶倾角分布密度

表 2 中所列是叶倾角二次测定结果的平均值,频数栏中是出现在各倾角范围内的叶片数,如 0—15°, 15.1°—20°, ……。

表 2 茶树叶片倾角分布

| 叶片倾角 | 15° | 20° | 25° | 30° | 35° | 40° | 45° | 50° | 55° | 60° | 65° | 70° | 75° | 80° |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 实测频数 | 2 | 0 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 9 | 11 | 5 | 4 | 3 | 3 | 1 |
| 计算频数 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 8 | 9 | 8 | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 |

计算表明,叶倾角分布偏度为 -0.23,峭度 2.91,方差估计 203.74,说明叶倾角分布较为分散。经统计检验,叶倾角基本服从正态分布,其密度函数为:

$$f(x) = \frac{A_0}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2} \quad 0 \leq x \leq 80 \quad (3)$$

其中 σ^2 和 μ 分别表示方差和数学期望, x 代表倾角取值,以度为单位, A_0 为归一化系数, $f(x)$ 是分布密度,满足下述关系:

$$\int_0^{80} f(x) dx = 1$$

将有关参数代入式(3),求得叶倾角分布频数估计值。从表 2 中可见,除个别角度范围之外,计算值与实测值基本吻合。

3. 太阳辐射垂直分布特征与叶面积指数

植株茎叶等器官对太阳辐射的分层吸收、反射和透射作用形成了它在植物群体中的垂直分布特征。群体结构、生理活性和辐射光谱不同时,分布特征也不相同。图 2 是中午前后分别在小麦、樟树和茶树群体中的观测结果(二天或一天中 10、12 和 14 时三次资料平均)。为便于讨论,取纵坐标为相对高度 $Z=z/H_C$,横坐标为相对太阳辐射 $RI=I/I_0$, I 和 I_0 分别是 z 高度和群体上方的太阳辐射。图 2 所示,总辐射的透性较好,叶片对 PAR 的吸收较强,群体中任一层次,相对总辐射皆高于相对光合有效辐射。观测是在春末夏初进行的,当时,环境条件适宜,植株生长旺盛,光合作用强,并且,各群体皆已形成较大的叶面积指数,PAR 穿过叶层时,绝大部分已被吸收利用,而对总辐射的截获相对较弱。

樟树和茶树叶片集中分布在冠层中部或顶部,光线透过叶层时,已有近 90% 被截获。从距离上看,茶园冠顶 20cm 内,叶片十分密集,绝大部分光能消耗在该层中,20cm 以下,相对辐射小于 10%。樟树幼林叶层厚,叶片分布比较疏散,光能衰减较慢,距冠顶 50cm 处,相对辐射尚在 10% 以上。小麦叶倾角大,多在 70° 以上,群体下部受光条件好,因此,在小麦生长旺盛期,群体下层仍有相当数量的叶片生长,这对提高群体光能利用率和小麦增产有利。

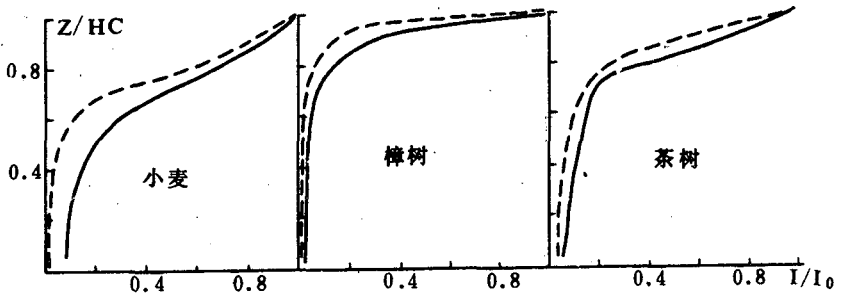


图2 中午前后各群体内部太阳辐射垂直分布
(实线总辐射,虚线光合有效辐射)

一天当中,由于太阳高度角、植物生理活动等的变化,各层次中对太阳辐射的吸收、反射和透射也不相同,形成相应的太阳辐射垂直分布特征。图3所示,群体下部受光条件以中午前后为佳,早晚较差,这主要是太阳高度角的变化所致。早晚时分太阳低,叶片反射率较大,光线进入群体内部相同距离时所经过的叶片较多,透射的光量少。中午前后则相反,光照条件优越,总辐射尤为明显。

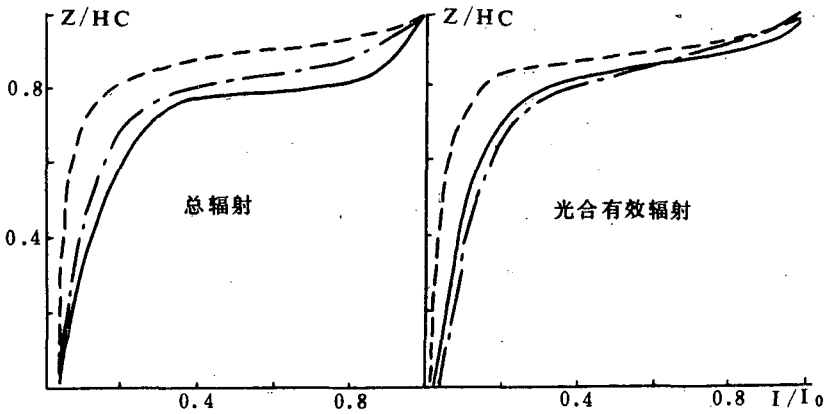


图3 不同时刻茶树群体内部太阳辐射的
垂直分布特征(虚线08h,实线12h,点划线16h)

小麦和茶树群体中,太阳辐射垂直分布与叶面积指数之间基本服从指数律:

$$I = I_0 e^{-kF} \tag{4}$$

其中 k 是消光系数, F 表示从冠顶到 z 高度的累积叶面积指数。式(4)对小麦和茶树群体中各时刻太阳辐射垂直分布的拟合效果很好,大多通过 0.01 水平 F 检验。

4. 消光系数的变化

门司和左伯之后,许多学者对他们提出的指数衰减规律作过探讨。在肯定其意义的前提下,认为 k 值受制于许多因素,对于给定的植物群体,一天当中, k 值主要随太阳高度的

变化而有规律地起伏。

将茶树和小麦群体中各个时刻的观测资料代入式(4), 求出相应的 k 值, 结果列于表 3。从表中可见, 光合有效辐射的 k 值(k_{PAR})大于总辐射的 k 值(k_{TSR}), 尤以小麦群体更为明显, 反映出植物叶片对太阳辐射的选择吸收特征。从时间上看, k 值以中午前后最小, 上午和下午较大, 这主要与太阳高度角的日变化有关。

表 3 群体消光系数(k)的时间变化(一天或二天资料平均)

| 时间(h) | | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 拟合方程 | 误差(%) |
|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------|-------|
| 茶 树 | k_{TSR} | 0.717 | 0.525 | 0.484 | 0.536 | 0.696 | $k_{TSR}=0.3027+0.2043/\sin h_0$ | 4.96 |
| | k_{PAR} | 0.781 | 0.671 | 0.560 | 0.693 | 0.862 | $k_{PAR}=0.3884+0.2299/\sin h_0$ | 4.69 |
| 小 麦 | k_{TSR} | 0.533 | 0.450 | 0.496 | 0.499 | 0.548 | $k_{TSR}=0.4094+0.0678/\sin h_0$ | 3.26 |
| | k_{PAR} | 0.865 | 0.790 | 0.711 | 0.803 | 0.963 | $k_{PAR}=0.5525+0.1937/\sin h_0$ | 2.26 |

根据表 3 中的结果, 消光系数与太阳高度角(h_0)的正弦成反比, 满足下述关系:

$$k = a + \frac{b}{\sin h_0} \quad (5)$$

其中 a 、 b 是与群体特征、生理因素、光谱组成等因素有关的参数。拟合方程和相对误差均列在表 3 中, 从表中可见, 式(5)的拟合效果令人满意, 相对拟合误差在 5% 以下, 通过 0.01 或 0.05 水平 F 检验。当 $a=0$ 时, 式(5)与 Norman^[5]提出的函数形式基本一致。

四、结 论

描述植物群体的叶面积垂直分布时, 式(1)具有一定的普遍意义, 对于不同的群体, 只需根据实测资料调整其中有关参数, 并且, 参数的生物学意义明确, 求解方法合理。由于人为修剪和系统发育的结果, 茶树叶片分布集中。叶倾角基本服从正态分布, 方差大, 峭度小, 在有关数值试验时应引起重视。

在植物群体内部的传递过程中, PAR 更容易被上层叶片截获利用, 总辐射穿透到群体下部的可能性较大, 尤其象茶园这种叶片集中的植被, 20cm 厚的叶层截获了 90% 的光能, 使得下部光照微弱, 几乎没有叶片生长。随着太阳高度的变化, 一天当中, 群体下部的光照条件以中午前后为佳, 早晚较差。

近年来, 群体内部光能分布的数值模拟有了进一步发展, 考虑到 Penumbra(半影)效应之后, 模型更加完善^[8]。但在实际应用中, 这些模型和计算方法皆失之过繁, 且需相应的测试手段和资料。根据我们的资料分析, 经典的指数衰减模型对于象茶园和小麦这样的低矮密集群体是适用的。考虑到消光系数规律性的日变化之后, 指数律仍不失为一种简单实用可信的数学模型。

茶树和小麦群体中的消光系数与太阳高度角之间存在关系式 $k=a+b/\sin h_0$, 拟合效果很好, 除一组数据通过 0.05 水平 F 检验外, 其余皆通过 0.01 水平 F 检验。

参 考 文 献

- [1] 翁笃鸣等,小气候和农田小气候,农业出版社,234—236,1981年。
- [2] 崔启武,林冠的结构和光的分布,地理学报,36,2,196—208,1981。
- [3] 陈德兴,作物群体冠层流模式及数值试验,中国农业气象,10,3,16—19,1989。
- [4] Kondo, J. and Akashi, S., Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers, *Boundary-Layer Meteorology*, 25, 45—54, 1976.
- [5] Norman, J. M., Modeling the Complete Crop Canopy, In: Barfield, B. J. and Gerber, J. F. (eds), Modification of the Aerial Environment of Plants, Amer. Soc. Agric. Engin. St. Joseph, Michigan, 249—277, 1979.
- [6] Yamada, T., A numerical study of turbulent airflow in and above a forest canopy, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 60, 1, 439—454, 1979.
- [7] Meyers, T. P. and Paw U, K. T., Modeling the plant canopy micrometeorology with higher—order closure principles, *Agric. Forest Meteorology*, 41, 143—163, 1987.
- [8] Wang, H. J. and Baldocchi, D. D., A numerical model for simulating the radiation regime within a deciduous forest canopy, *Agric. Forest Meteorology*, 46, 313—337, 1989.

CANOPY STRUCTURES AND RADIATION REGIMES AND THEIR VARIATIONS

Wang Xinli Li Xiangxi

(Nanjing Forestry University, Nanjing, 210037)

Abstract

A mathematical model was introduced to describe the vertical distributions of leaf area densities of tea, wheat, and cinnamon canopies and it fitted the data very well although their patterns are considerably different. Therefore, this model is theoretically significant. Leaf declination angles of tea, with a great covariance, tend to be a normal distribution. Radiation regimes vary notably in different canopies; however, light conditions in the lower part of the canopies are the best around noon when extinct coefficient is the smallest. The extinct coefficients being greater for photosynthetically active radiation (PAR) than those for total radiation (TSR) are closely related to the inverse proportion of solar altitudes ($\sin h_0$) during one day. Consequently, under rational consideration of daily variation of the extinct coefficients, traditional exponentially extinguishing relationship is still a good mathematical model for describing radiation regimes within plant canopies with the advantages of being simple, practical, and trustworthy.