

考虑开放度的树冠层辐射传输模型及实验验证^{*}

王锦地

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

项月琴

(中国科学院地理研究所 北京 100101)

李小文

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 基于树冠层的结构特征,从方向间隙率定义了冠层中不同空间位置对天空散射入照的开放度及其在冠层中的分布,建立了入射辐射在冠层中的衰减与传输模型。应用对冠层结构、总入射辐射、辐射在冠层中衰减等的野外观测数据,对模型进行了验证。模型成功地解释了光在树冠层中辐射传输的变化规律。

关键词 辐射传输模型,冠层结构,开放度

1 引 言

入射辐射在树冠层表面的反射辐射,是光与树冠层中介质相互作用的结果。就辐射传输过程来讲,树冠表面的反射辐射是冠层元素对入射到冠层的太阳直接辐射和天空散射辐射的散射形成的,遥感信号则是它们的总和效果。因此,研究光在冠层中的辐射传输过程,是研究遥感信号产生机理的重要内容。

冠层反射的辐射传输模型,通常假定冠层为均匀介质层,将冠层的叶面积指数,平均叶倾角等作为冠层结构的基本参数;或在垂直方向上将冠层分成若干层分别处理,延用水平均匀介质中的辐射传输过程建立模型^[1]。这对于水平均匀植被如较密植的农作物,草场等基本合理。但当植株的分布稀疏时情况就不同,如在郁闭度小的森林、果园等,植株间呈现出明显的空隙,这种不连续植被作为一介质层,不再满足水平均匀的情况,因而光在其中的辐射传输和最终在冠层表面逸出的辐射,均与冠层的三维几何结构和叶丛密度的分布参数有关。本文以树冠为例,实际观测了总入射辐射、辐射在冠层中的衰减、冠层几何结构、和冠层中植物组分的光学特征,研究将“光在介质层中的路径散射模型”^[2]应用于树冠层的可能性,建立光在这种非均匀介质层中的辐射传输模型,并以阴天条件下的实验数据为例对模型进行了验证。

2 树冠层中的辐射传输模型

2.1 冠层结构参数

从遥感像元的尺度而论,不连续植被的基本空间结构可以看作是具有某种形状的几何体(如树冠)以某种分布集合于视场中而成。因而树冠的形状及植株在视场中的分布就成为描述不连续植被冠层结构的基本参数。

树冠植株在视场中的分布,最常用的描述参数是植株密度和位置的二维分布。

树冠的形状可以其几何尺寸来描述,包括树高、树冠幅、枝下高等。其内部结构参数,即树干、枝条和叶片密度则依树种和生长期变化。目前常用的参数,除叶面积指数,全植被指数之外,还有更详细的叶面积体密度(FAVD)及其三维空间分布^[3]。FAVD定义为冠层中单位立体体积元中含有的叶片总面积,单位为 m^{-1} 。

2.2 天空散射光在冠层中的辐射传输

在研究水平均匀冠层的辐射传输时,KM理论将入射辐射分为两部分,即太阳直接辐射入射通量 F^- 和天空散射辐射入射通量 E^- ;介质层向上的反射辐射也相应分为两部分,即特定方向反射通量 F^+ 和漫散射通量 E^+ 。采用这4个通量作为基本参量,KM模型简化了辐射传输方程的求解。李小文

等在此基础上,对光在均匀介质层中的传输过程进行了全面、细致和清晰的分析,定义了光在均匀介质层中的 8 个路径散射分量,并进而给出了有限厚度均匀介质层中路径散射的近似解析表达式^[2]。

对水平方向均匀的植物冠层,假定冠层内的一水平薄层,具有有限厚度 d_i ; 当其顶部入照为各向同性的散射光时,设散射光通量为 $E^- = Q_0$ 。从 Hapke 的 KM 方程的原理^[4],我们进一步推导得到水平薄层底部的两个通量,即介质层 d_i 底部向下的漫散射通量和向上的漫散射通量。

介质层 d_i 底部向下的漫散射通量:

$$E_{di-} = E^- e^{-2\gamma\tau d_i} \quad (1)$$

其中: γ 为描述该介质层中组分反射的参数, $\gamma = (1 - \omega)^{1/2}$, ω 为叶面反照率; τ 为介质层的消光系数,取决于叶面倾角的分布 LAD 和叶面积体密度 FAVD 的空间分布。

介质层 d_i 底部向上的漫散射通量:

$$E_{di+} = R_{ff}^\infty E_{di-} \quad (2)$$

其中: $R_{ff}^\infty = (1 - \gamma)/(1 + \gamma)$,为假定 d_i 底部为一半无限介质层时介质层的扇入扇出反照率^[2]。

我们进一步将上述模型扩展到研究树冠层中的辐射传输。对单棵树冠,在用间接测量法^[3]获得了树冠内结构参数的三维分布的条件下,将树冠分割成若干个水平薄层,当薄层足够薄时,对每一薄层,在树冠内层给定尺寸的水平薄层窗口内,可以近似将其中的叶面密度视作一定,为该水平薄层窗口中各组分单元 FAVD 的平均值。则(1)、(2)式便可用于近似计算该水平薄层窗口中漫散射辐射的路径散射通量。由此,就可以计算散射天空光入照条件下,从树冠层垂直向下直到冠层底部,在树冠层中不同高度、不同位置上向上和向下的辐射通量。

2.3 树冠层的开放度对不连续冠层中辐射传输的影响

在研究不连续植被及其下地表面面对光辐射的吸收与反照率模型时,李小文等^[5]曾定义了不连续植被冠层的总体开放度,以此描述遥感像元尺度上不连续植被的冠层结构特征,作为研究光在冠层中辐射衰减的重要参量。

前述(1)、(2)式仅适用于水平方向连续的树冠,因此当以单棵树冠为目标,研究其中的辐射传输时,我们发现在树冠内靠近树干的部位,上述(1)、(2)式的条件可以近似满足。但在树冠靠近外圈的部位

(外层),当组分的密度较低,且分布不均匀时,上述模型就不适用了。在这种情况下,入射到树冠内的天空散射辐射将受到两个因素的影响:植株密度的影响和树冠外层叶面密度的影响。在这里,我们用开放度来描述这两种影响。不同位置的直接入照通量将随其开放度的增大而增加,而这部分入照通量将对相关区域的总辐射通量作出不可忽略的贡献。

为定量描述这种贡献,我们定义单棵树冠内不同空间位置在给定方位和方向上对天空散射入照的开放度系数:

$$k_{open}(r, h) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} P_{g\varphi}(\theta_i, \varphi_i | r, h) d\theta_i d\varphi_i \quad (3)$$

其中: r 为树冠中给定点距树中心的距离, h 为给定点的高度, θ, φ 分别表示天顶角和方位角,则 $P_{g\varphi}(\theta_i, \varphi_i | r, h)$ 为在给定点 (r, h) , 在 (θ_i, φ_i) 方向上的方向间隙率,

$$P_{g\varphi}(\theta_i, \varphi_i | r, h) = e^{-LK(\theta_i)S} \quad (4)$$

其中: L 为组分单元的 FAVD, S 为在 θ_i 方向上透过滤组的入射路径长度, $K(\theta_i)$ 为组分在 θ_i 方向上的投影系数,它是组分单元中平均叶面倾角的函数。

已知树冠层的几何结构和植被组分密度在树冠层中的三维空间分布的条件下,树冠中任一位置 (r, h) 的开放度系数 $k_{open}(r, h)$ 就可由(3)、(4)式计算得出。

$k_{open}(r, h)$ 描述了在树冠中任意位置 (r, h) 上介质组分单元获得直接入射的天空散射辐射的比例。显然,开放度系数越大,说明入射辐射直接到达该位置组分单元的比率越大。因此我们将 $k_{open}(r, h)$ 作为天空散射辐射的直接入照比率参量,用于对树冠外层辐射传输特征的建模。图 1 所示为单棵树冠层中不同给定高度上开放度分布的方位平均,计算所用树冠结构参数为间接重构测量结果^[3]。图中 r 为组分单元距树干中心的距离; h 为高度,地面 $h=0$ 。

当 $k_{open}(r, h)$ 大于某一阈值时,我们即认为天空散射直接入照对该点辐射通量的贡献必须考虑。则在 (r, h) 处的全部向下漫散射通量,应为自冠层顶垂直向下的漫射辐射通量的逐层衰减部分与天空散射直接入照部分的加权和,即

$$E^-(r, h) = k_1 \left(\sum E_{di-} \right) + k_2 E^- \quad (5)$$

其中, $K_1 = 1 - k_{open}k_0$, $K_2 = k_{open}k_0$ 。 k_0 取决于 k_{open} 的阈值,用以校正 k_{open} 的计入对总辐射通量计算的影响。

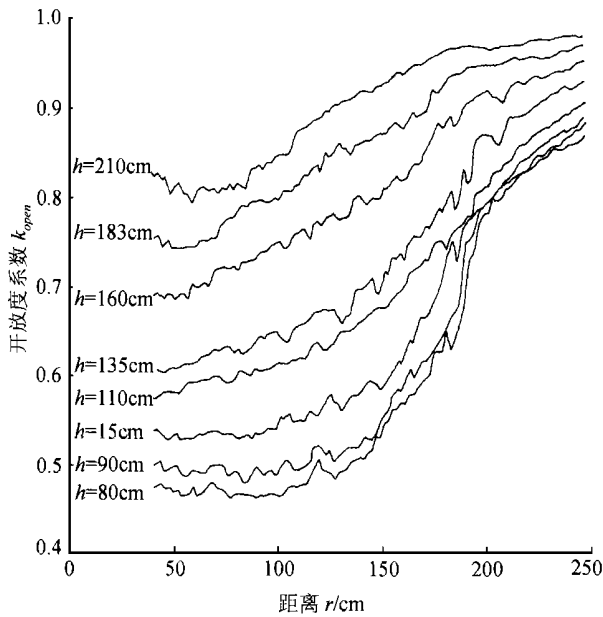


图 1 树冠层中不同空间位置(r)对天空散射辐射入照的开放度分布

Fig.1 The vertical distribution of openness within and under tree crown

3 野外观测数据获取

为研究不连续冠层二向反射分布特征及其与冠层几何结构的关系,我们于 1995 年 5 月到 10 月、1996 年 8 月,在昌平区西沙屯苹果园进行了多次实地观测,入射辐射在树冠层中的辐射传输是其中的一个重要内容。我们在果园内选择 3×3 棵树为观测样区,并取该样区内居中的一棵树详细测量了树冠的结构参数,包括组分密度的三维空间分布,并同步观测取得了晴天和阴天不同天气条件下的太阳和天空辐射,和入射辐射在树冠层中和层下地表的衰减数据。

3.1 树冠结构参数与植株密度

我们在选定的 3×3 棵树样区,用直接测量的方

法测量了每棵样树的几何尺寸,包括:树高,最大冠幅高度,平均冠幅半径,枝下高,主干胸径,树间 4 个方向的间距^[6]。由此可以计算得到该观测样区的植株密度,垂直植被覆盖度等参数。

对该样区内居中一棵树,采用我们自己研制的底视多方位断层扫描成像系统(TCT),用树冠断层成像的间接测量方法获得了树冠几何形状的三维重构结果,并进而重构了树冠内叶面积体密度的三维空间分布,由此获得了该树冠精细的三维结构参数的完整测量结果,重构树冠的间接测量结果已用手工直接测量的样方数据进行了验证^[3]。

3.2 入射光及其在树冠层内辐射衰减的测量

对该样区的辐射测量,分别在晴天条件和阴天条件下进行,本文所述的工作仅采用其中阴天的观测数据,即考虑在散射天空光照条件下树冠层的辐射衰减特征。

辐射观测采用美国 LI-COR 公司生产的点状光子传感器,波段范围为 $0.4-0.7 \mu\text{m}$ (PAR)。观测项目包括:(1)到达树冠层顶部的总辐射辐照度 Q_0 ,天空散射辐射辐照度 D_0 。(2)树冠内设定观测点的上、下半球辐照度 Q_{par} 和 Q_r 。观测点设定在树冠内二个不同的高度上,每个高度设 8 个方位,每个方位上在距树中心两个给定距离上设观测点,冠内两个高度共计 32 个测点。(3)果园树下地表也设定 8 个方位,分别与树冠内 8 个方位相同,每个方位上设 6-8 个固定位置的测点,直到该方位上另一棵树下的主干处为止,测量样区内各测点的上、下半球辐照度。(4)果树叶片、枝条表面和地面杂草叶片的光谱反射率和透射率。在上述观测同时还用 SE590 光谱辐射仪对以上项目进行了观测,观测时去掉了 SE590 探头前的 $1^\circ/15^\circ$ FOV 镜头,代之以具有已知衰减曲线的毛玻璃。从观测数据计算得到树冠内和树下各观测点的辐射透过率 $T_Q = Q_{par}/Q_0$ 和反射率 $T_r = Q_r/Q_{par}$,一组实验观测结果列于表 1、表 2。

表 1 树冠层中辐射衰减观测数据与模型计算结果的比较

Table 1 Comparison between the measurement and calculated data within canopy

h/cm	r/cm	Q_0	Q_{par}	T_Q	E_-	T_E
135	50	0.172	0.0296	0.172	0.0456	0.256
135	100	0.172	0.0466	0.271	0.0564	0.326
183	50	0.190	0.0901	0.474	0.0826	0.434
183	100	0.190	0.1215	0.639	0.1050	0.511

表 2 树冠层下辐射衰减观测数据与模型计算结果的比较

Table 2 Comparison between the measurement and calculated data on background

h/cm	r/cm	Q_0	Q_{par}	T_Q	E_-	T_E
15	50	0.115	0.0268	0.233	0.0317	0.276
15	100	0.115	0.0310	0.270	0.0332	0.289
15	200	0.115	0.0760	0.663	0.0896	0.782

4 模型计算结果与观测数据的比较

4.1 天空散射光在树冠层内的辐射传输

依照前述模型,我们计算了天空散射光在树冠层中的辐射传输,包括天空散射光垂直向下在树冠层中的衰减和传输,和树冠外层因较大开放度上半球直接入射辐射对测点总辐射通量的贡献。

如前所述,我们将树冠分成若干个水平薄层,根据观测点在冠层中的位置给定其上方的水平薄层窗口,其尺寸的选择原则是保证其足够大,使在薄层中可以假定为具有均匀的叶密度,其密度根据采用间接测量方法重构的冠层 FAVD 的空间分布计算得出,进而就可按照(1)、(2)式计算各个水平薄层介质层中的路径散射。从冠层顶向下逐层计算,直到各测点,得到树冠内各测点处由于天空散射光垂直向下的辐射传输对测点上、下半球辐射通量 E_+ 和 E_- 的贡献。

在树冠层内层靠近树干的观测点,由于其开放度较小,计算中可不计入开放度因子的影响,直接采用仅考虑天空散射入射垂直向下的传输的路径散射模型,基本上可以较好地解释实测的结果,模型计算值与观测数据吻合较好。但在树冠外层,由于开放度的明显增加,较多的天空散射光,包括环境辐射直接射达测点,当 k_{open} 大于某一给定的阈值 k_t 时,应考虑开放度对测点半球辐射通量的贡献,其贡献量按(3)、(4)式计算。

式(5)给出了综合考虑测量的总上、下半球辐射通量的模型,模型计算结果见表 1,其中光合有效辐射衰减系数 $T_E = E_- / Q_0$ 。从图 2 中可见模型计算结果与实测数据间有较好的相关性。图 2(a)、(b)分别为对不同时间观测的两组数据与模型计算值的比较。其中○表示树冠内 8 个方位不同高度 h 和距树中心距离 r 处共 32 个测点的观测值与模型计算值的比较,●所示为相同 r 、 h 点 8 个方位的平均值。

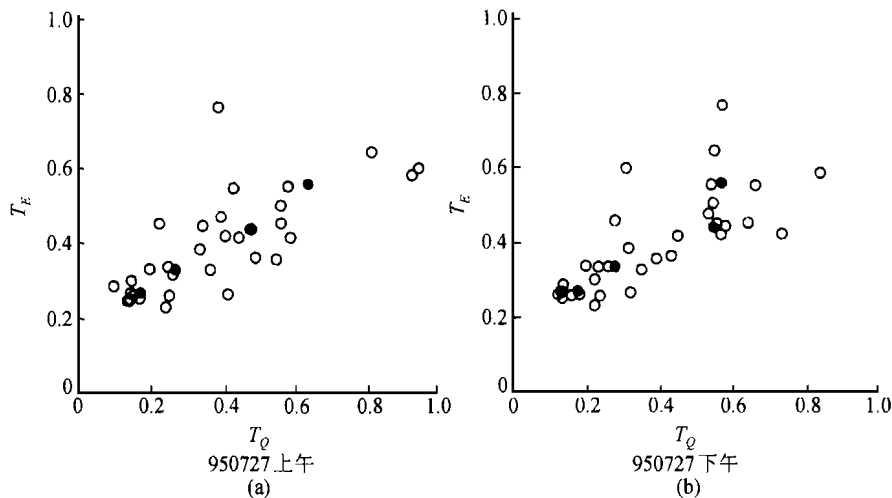


图 2 树冠层中观测点辐射衰减系数模型计算值与观测值的比较

Fig. 2 Comparison between measured and calculated transmittance within tree crown

4.2 树冠下地表的半球反射辐射

由于果园植株间有一定的距离,树冠下地表的开放度的变化对辐射分布的影响更加明显。如图 1 所示,树冠下地面附近的开放度 ($h=15\text{cm}$) 明显高于树冠下层的开放度 ($h=80\text{cm}$)。因而在距树干较

远处的树下观测点,其接收到总的半球辐射通量,含有大量直接入照的天空散射光和环境辐射的成分,其对总辐射的贡献则由测点的开放度的大小决定。这时若仅采用入射辐射垂直向下在树冠层中衰减的路径散射模型,计算的结果会明显低于观测的实际

情况。对这些测点而言,计算中考虑了开放度系数后,即用(3-5)式进行计算,其结果与观测数据间就

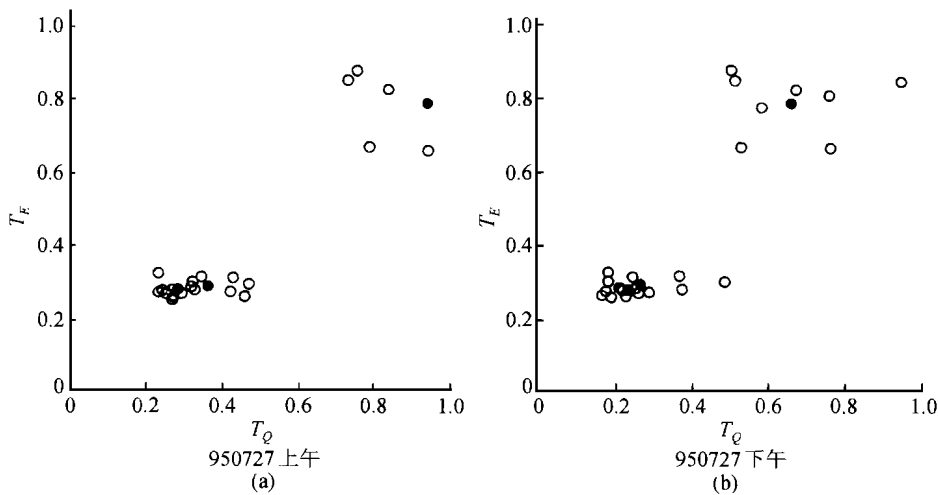


图3 树冠层下观测点辐射衰减系数模型计算值与观测值的比较

Fig. 3 Comparison between measured and calculated transmittance on background

5 结论与讨论

本文所述光在树冠层中的辐射传输模型,主要针对果园,稀疏林地等树冠间具有明显间隙的不连续冠层,对这种冠层结构,入射辐射在层中的衰减与传输,可以简单地表示为入射辐射从冠层上方垂直向下的辐射传输的贡献与直接入射辐射贡献的加权和,其中前者可用光在水平均匀介质层中的路径散射模型计算得出,而后者基于由方向间隙率模型定义的开放度系数对冠层结构稀疏程度的描述来建模。我们采用苹果园实测数据对模型进行了验证,结果表明这一建模思路是合理的。本模型大大地简化了通常用于不连续植被冠层的辐射传输模型,物理意义明确,可望用于模型反演。

值得一提的是,在已知冠层结构的条件下,用方向间隙率模型可以计算冠层内给定空间位置点的开放度,也可以计算出冠层内开放度的三维空间分布,而这一分布对于进一步估计冠层内和层下地表的辐射通量及其它地表能量平衡参数具有实用意义。推广到热红外辐射遥感领域,在采用方向性瞬间模型估计出组分温度的基础上,以过程模型建立与其他应用密切相关的参数的定量关系时,冠层内开放度的三维空间分布可以作为重要的参量。

本文所述的工作,目前仅以阴天条件下获取的观测数据为例对模型进行了验证。对晴天条件而言,进一步考虑到直射光,则主要应考虑太阳入射辐射方向与冠层几何结构之间的关系,在路径散射中

有较好的一致性,这表明本模型能够很好解释这种不连续植被冠层下方辐射衰减的机理(图3、表2)。

加入直入扇出反射率的贡献。冠层三维空间中某处开放度影响对总辐射通量的贡献,也将同时取决于其与入射方向之间的几何光学关系。发展相应的模型还有待进一步的研究工作。

致谢

北京师范大学朱启疆教授、高峰、张红,中国科学院遥感应用研究所刘毅,地理研究所栾禄凯等参加了野外观测工作,谨此致谢。

参考文献 (References)

- Goel, N. S. Models of Vegetation Canopy Reflectance and Their Use in Estimation of Biophysical Parameters from Reflectance Data. *Remote Sensing Reviews*, 1988, **4**: 1-212.
- Li Xiaowen, Ni Wenge, et al. Decoupling Path-scattering of Light in a Homogeneous Layers and Multiple Bouncing at its Non-Lambertian Bottom. *Science in China (Series E)*, 1996, **39**(6): 656-669.
- Wang Jindi, Li Xiaowen, Xiang Yueqin. TCT Algorithm Validation Using Measurement Data of Coniferous and Deciduous Crowns. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(Suppl.): 62-70. [王锦地, 李小文, 项月琴. 用针叶和阔叶树冠的观测数据对树冠断层成像算法的验证. *遥感学报*, 1997, **1**(增刊): 62-70.]
- Hapke, B. Bidirectional Reflectance Spectroscopy. *Journal Geophys. Res.*, 1981, **86**(B4): 3039-3054.
- Li Xiaowen, Wang Jindi, Strahler A. H. A Hybrid Geometric Optical-Radiative Transfer Approach for Modeling Light Absorption and Albedo of Discontinuous Canopies. *Science in China (Series B)*, 1995, **38**(7): 807-816.
- Xiang Yueqin, Zhou Yuhua, Liang Lujia, et al. Measurements of Radiation Transmittance and Reflectance of Discontinuous Canopies. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(Suppl.): 54-61. [项月琴, 周允

华·栾禄凯等. 不连续植被冠层辐射透过率和反射率的测量. 遥感学报, 1997, 1 (增刊): 56—61].

电学院无线电技术系。现从事植被冠层遥感机理, 多角度遥感模型的实验验证和模型反演等科研工作。已发表第一作者论文 10 余篇, 合著专著 1 部。

作者简介

王锦地, 女, 1955 年生, 副研究员。1982 年毕业于北京邮

Modeling the Openness Distribution and Radiative Transmission within Tree Crown Canopy, Measurement and Validation

WANG Jin-Di

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

XIANG Yue-Qin

(*Station for Agroecology and Environmental Technology, Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

LI Xiao-Wen

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

Abstract In the research of remote sensing mechanism, the Canopy Reflectance (CR) models established the relation between the bidirectional reflectance feature and canopy structure. This makes the possibility to retrieve the canopy structure parameters from multiangular remote sensing data by CR model. In our Geometric-Optical BRDF modeling study for forest canopy, we notice that the reflectance signature of sunlit crown is not uniform, a sub-model for modeling its feature is needed to evaluate the contribution of this component to the BRDF of surface.

In this approach, to model the effect of canopy structure on the radiation transmittance and reflectance within canopy, Li's path-scattering model for homogeneous layers is developed to calculate the transmittance in different layers within crown. In the positions where the foliage volume density are lower, such as near the surface of crown, the contribution of incident radiation is modeled by the openness distribution within tree crown, based on our directional gap probability model.

Field measurements were made in the apple orchard, North of Beijing. 3×3 trees was taken as a sample set. The geometric size and foliage area volume density (FAVD) distribution of tree crowns were measured using our Tree Computed Tomography indirect measuring System (TCITS). The solar radiation, diffused skylight, hemispherical radiation at the given test points within and below the crowns were measured by LI-COR quantum sensor (LI-190SA, 400—700 nm).

The measured incident radiation was taken as input of the model to calculate the radiative transmission within and below crowns, the canopy architecture was described by FAVD distribution and LAD. The measured radiation at points was used to validate the calculated one. The model, measurements and validation results are presented in this paper, which show that the modeled radiative transmission fit the measurement data very well. The simplified model is hopeful to support the CR model inversion study.

Key words Radiative transmission, Canopy architecture, Openness