

利用 3D 模型模拟天空与叶面散射对玉米冠层截光率的影响

孔 娅, 劳彩莲*, 曹素云

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 该文利用并行蒙特卡罗光线跟踪模型定量分析了天空散射与叶片散射对玉米冠层截光率的影响。模拟试验表明: 相同辐射强度时, 冠层截获的光强与受到照射的叶片在天空散射时都比直接辐射时多; 当太阳高度角小于 60° 时, 冠层在阴天截获的总光强小于晴天, 但至少 60% 的叶片在阴天截获的光强大于晴天时截获的光强; 叶片散射对冠层光分布的影响与波长有关, 在模拟的红光 (650 nm)、绿光 (540 nm) 和近红外 (760 nm) 波长中, 叶片次级辐射对玉米冠层截光率的影响在近红外最大, 绿光其次, 红光最小。该研究结果可为植物冠层光合生产力及光环境模拟研究提供参考。

关键词: 辐射, 漫射, 散射, 三维计算机图形, 计算机模拟, 天空辐射, 叶片散射, 冠层截光率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.05.044

中图分类号: S126, S161.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-05-0248-05

孔 娅, 劳彩莲, 曹素云, 等. 利用 3D 模型模拟天空与叶面散射对玉米冠层截光率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 248-252.

Kong Ya, Lao Cailian, Cao Suyun. Effect of sky radiation and leaf scattering on maize canopy light interception by 3D modeling [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 248-252. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

植物冠层接收到的辐射, 既包括来自太阳的直接辐射和天空散射辐射, 也包括由于冠层元素的反射和透射所形成的次级散射。

Goudriaan^[1]利用敏感度分析后发现天空散射对光合速率的影响程度大于叶片角度分布的影响; Norman 和 Arkebauer^[2]用 Cupid 模型证明了冠层的光能利用率(LUE)与光合有效波段的天空散射成线性关系, Choudhury^[3]用不同的模型也验证了此观点; Zheng 等^[4]应用基于 Z-Buffer 算法的模型, 对水稻冠层在不同天空散射比例下的光合速率进行了计算, 表明天空散射比例增加明显地提高了群体光合速率; Gu 等^[5]用 Tower Flux 测量也得到了天空散射提高了冠层的光合效率的结论; 对于很多树木冠层, 天空散射提高了近 50%~100% 的 LUE^[6]。虽然研究普遍认为天空散射光的冠层 LUE 大于直射光, 但是对于不同的冠层结构, 散射光和直射光的影响不尽相同。Brodersen 等^[7]测量发现天空散射对叶片尺度和冠层尺度的光合作用影响不同。

冠层光分布不仅受天空辐射的影响, 也受冠层内部散射(主要是叶片散射)的影响。光作用在植物叶片上时不是被叶片散射就是被叶片吸收, 叶片的散射主要由反射和透射组成。Seishi 和 Isobe^[8]观测得到叶片散射在下

层植被的光分布中扮演了必不可少的角色。Wang 等^[9]指出在以往关于植物吸收光合有效辐射的计算中, 一直忽略了叶片散射的影响。Castro 和 Fetcher^[10]在对冠层截光率的影响因素的研究中, 也没有将叶片散射考虑在内。

为此, 本文利用并行蒙特卡罗光线跟踪(PMR)模型模拟在不同辐射条件下的冠层的光分布, 用于评价天空散射以及叶面散射对冠层截光率的影响。

1 考虑散射的天空辐射模拟

1.1 天空辐射理论模型

直接辐射是从太阳直接到达地面的辐射, 散射辐射则是天空辐射经大气层中的空气分子、云滴和气溶胶等的散射作用(天空散射)后到达地面的辐射。

在天空辐射中, 同时存在直接辐射与散射辐射, 但因天气状况而所占比例不同。晴天时直接辐射占大部分比例, 阴天以散射辐射为主。Bird 和 Riordan^[11]指出, 晴天时到达地球表面的天空辐射里约 85% 是直接辐射, 15% 为间接辐射(散射辐射), 在阴天, 几乎 100% 为散射辐射。SAIL(Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves)模型^[12]中, 同样设定晴天的天空散射最多占天空辐射的 10%, 阴天的天空散射为 100%, 但各个方向的辐射强度不尽相同, 通常用辐射亮度来表示天空的辐射强度分布。根据 CIE(International Commission on Illumination)标准全阴天天空散射亮度分布表达式为^[13]

$$\frac{L_{\gamma}}{L_z} = \frac{1 + 2 \sin \gamma}{3} \quad (1)$$

CIE 晴天空散射亮度分布标准

$$\frac{L_{\gamma}}{L_z} = \frac{0.32 (1 - e^{-\sin \gamma}) (0.91 + 10e^{-3Z} + 0.45 \cos^2 \chi)}{0.274 (0.91 + 10e^{-3Z} + 0.45 \cos^2 Z)} \quad (2)$$

收稿日期: 2010-09-03 修订日期: 2011-04-26

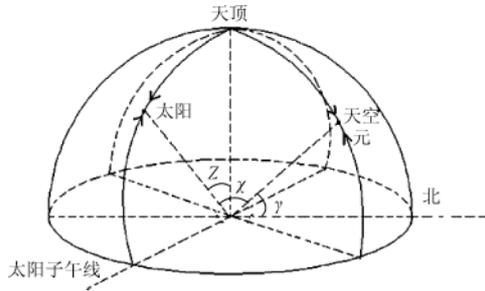
基金项目: 国家 863 课题 (编号: 2006AA10Z231)

作者简介: 孔 娅 (1986-), 女, 重庆市, 汉, 主要研究作物冠层 BRDF 模型。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。

Email: cau_kongya@sohu.com。

*通信作者: 劳彩莲 (1966-), 女, 浙江省, 汉, 副教授, 博士, 主要研究光谱技术及其应用、作物冠层光分布等。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: laowan@cau.edu.cn。

式中, χ 为太阳到天空元之间的角距离, ($^\circ$); Z 为太阳天顶角, ($^\circ$); γ 为天空元的高度角, ($^\circ$); L_z 为天顶亮度, cd/m^2 ; L_γ 为散射亮度, cd/m^2 , 太阳和天空元位置的角度定义如图 1 所示。



注: χ 为太阳到天空元之间的角距离, Z 为太阳天顶角, γ 为天空元的高度角。

图 1 太阳和天空元位置的角度定义

Fig.1 Geometry of the sun and sky element

1.2 直接辐射与天空散射的模拟

为了数值化模拟天空散射辐射, 需要将天空离散化, 划分成若干个辐射源, 其中每个部分相当于一个方位角、高度角、辐射强度不同的天空辐射。本文采用的是 Grant 等^[14]提出的 Turtle 模型, 利用立体角对天空散射进行网格划分的方法, 将天空划分为 46 个区域, 由五边形和六边形组成, 以它们的中心位置表示天空散射源的分布, 用高度角和方位角表示。

模型中每个辐射源发射出的光模拟为均匀的平行光线, 投放到冠层上方的一个与地面平行的虚拟平面上, 并根据模拟精度要求确定其投放密度。虚拟平面按照投放密度均匀地划分成小栅格, 在每个小栅格交点处投放一条光线。光线的方向根据辐射源的高度角 a_1 和方位角 a_2 确定, 方向表示为 (x, y, z) , x 为水平向右, y 为竖直向上, z 为垂直向里, 公式为:

$$\begin{cases} x = \sin(a_1) \times \cos(a_2) \\ y = \sin(a_1) \times \sin(a_2) \\ z = -\cos(a_1) \end{cases} \quad (3)$$

模拟并对比了两组理想天空辐射条件下的冠层光分布。一组是假定只有直接辐射和只有天空散射且天空总辐射强度相同。另一组是晴天和全阴天条件: 晴天时, 假设直接辐射强度为天空散射强度的 9 倍; 阴天时, 直接辐射为 0, 天空辐射根据 Richard^[15]提出的完全阴天环境下天空辐射强度分布模型来计算, 得到阴天辐射总强度是晴天总强度的 48.4%。

2 冠层结构与光学特性

模型的冠层区域的大小因计算情景而变化。一般计算时采用冠层的代表区域, 即冠层实测单元, 则虚拟冠层为实测单元在水平方向的连续复制, 如图 2 所示。

本文采用的冠层数据来自文献[16], 是 2002 年在中国农业大学西校区科学园的大田试验地的一个玉米冠层的实测数据, 为利用美国 Polhemus 公司的 3Space Fastrak 三维数字化仪对冠层实测域上的玉米植株进行主要器

官的三维空间坐标测定获得。构建冠层模型时, 利用线性插值以及 B 样条插值处理原始数据, 以三角形面元为单位拟合出玉米叶片表面, 每个三角形边长不超过 2 cm。

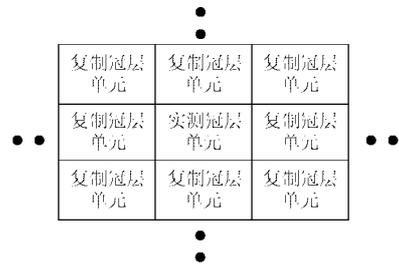


图 2 冠层复制

Fig.2 Copy of canopy unit

光作用在叶片上时被散射部分分为透射和反射, 叶片的透射近似为朗伯体 (Lambertian), 在红光波段, 设定透射率为 0.03, 近红外波段设定透射率为 0.47。为了便于计算, 将叶片的二向反射简化为各向同性的 Lambertian 模型^[17], 红光波段反射率为 0.056, 近红外波段反射率为 0.44^[18]。模拟计算时, 不同波段下的叶片反射率和透射率将不同。

3 PMR 模型

PMR 模型是基于索引的快速光线跟踪模型, 利用空间八叉树剖分技术实现, 这是一个空间非均匀网格剖分算法, 该模型将包围整个冠层的空间立方体按 3 个方向中剖面分割成 8 个立方体网格, 并组织成一棵八叉树。若某一子立方体网格中所含的三角面元数大于给定的阈值 (缺省值为 50), 则对该子立方体网格做进一步剖分。此过程递归地进行直到八叉树中每个叶结点包含的三角面元数小于阈值为止。

光线跟踪时, 从平行光的起点出发, 沿光线前进方向以此确定光线穿越的叶结点网格。若为非空叶结点则进行求交测试, 若求得与三角面元的最近交点则结束对该光线的跟踪, 若无交或当前叶结点为空, 则沿光线前进方向继续搜索, 直到到达跟踪深度或者射出包围盒为止。

因为整个模型在冠层与光线的求交部分耗时最多, 所以采用 MPI (message passing interface) 并行编程, 并在联想深腾 1800 机群上实现。

4 结果与分析

4.1 直接辐射与天空散射对冠层光分布影响的比较

图 3 为总辐射强度相同时, 只有直接辐射和只有天空散射的冠层光分布的模拟结果的可视化显示。图 3a 为天空散射时的冠层光分布, 图 3b 为太阳高度角为 90° 时直接辐射的冠层光分布, 虽然图 3b 中受直接辐射部分的叶片面元强度大于图 3a 对应的面元, 但图 3a 中每个面元接受强度比较一致, 光分布较均匀, 而图 3b 有较多的叶片之间的遮阴。

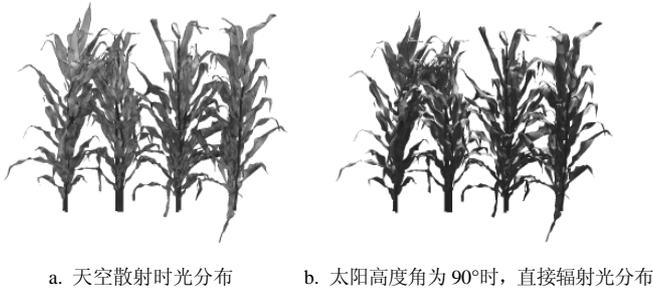


图3 玉米冠层光分布模拟结果

Fig.3 Light distribution simulation of maize canopy

表 1 列出了两组天空辐射条件下模拟的冠层光分布的统计结果。在相同辐射强度下，冠层在天空散射条件下截获的光强大于直接辐射条件下截获的光强。天空散射时冠层受到辐射照射的面元为 100%，直接辐射时冠层受辐射照射的面元最大达到总面元数的 50.5%。阴天冠层截获的光强与晴天之比随着太阳高度角的降低而下降。太阳高度角低于 60° 时，至少 60% 的叶片在阴天截获的光强大于晴天时截获的光强。

表 1 不同天空辐射条件下冠层光分布模拟结果统计
Table 1 Statics of canopy light distribution simulated in different sky radiation

| 太阳高度角/ $^{\circ}$ | 散射/直接辐射 ^① | 直射面元率 ^② /% | 散射面元率 ^③ /% | 阴天/晴天 ^④ | 晴<阴天元率 ^⑤ /% |
|-------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
| 90 | 3.0 | 38.2 | 100.0 | 1.2 | 70.2 |
| 75 | 2.7 | 47.7 | 100.0 | 1.1 | 65.0 |
| 60 | 2.2 | 50.5 | 100.0 | 1.0 | 62.1 |
| 45 | 1.9 | 48.3 | 100.0 | 0.9 | 61.3 |
| 30 | 1.6 | 39.9 | 100.0 | 0.8 | 65.7 |
| 15 | 1.2 | 27.6 | 100.0 | 0.6 | 65.9 |
| 10 | 1.1 | 24.2 | 100.0 | 0.5 | 66.0 |

注：①为冠层在天空散射时截获的光强与在直接辐射时截获的光强之比；②直接辐射照射到的面元个数与冠层总面元数之比；③天空散射照射到的面元数与冠层总面元数之比；④为阴天环境下冠层截获的光强与在晴天截获的光强之比；⑤为晴天时单个冠层面元吸收光强小于阴天此面元吸收光强的个数与冠层总面元数之比。

4.2 叶片散射

我们模拟得到了不同的太阳高度角时，在近红外、红光以及绿光波段，叶面次级散射在冠层中的光分布。图 4 显示了绿光波段太阳高度角为 30°，考虑次级散射和不考虑次级散射时冠层光分布。从图 4 中可以看出，考虑次级散射时冠层阴影处较亮。

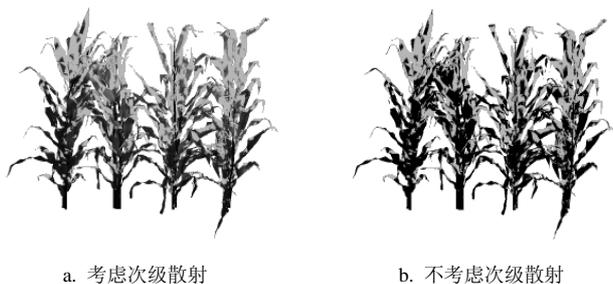


图 4 太阳高度角为 30° 时绿光分布图

Fig.4 Green light distribution with 30° solar elevation

对模拟结果进行了统计，表 2 为直接辐射和次级散射照射到的面元数和吸收总光强的比较。从表 2 可以看出，只有直接辐射时，冠层截获到光的面元分别在每个太阳高度角时约为总面元数的 40%~50%，当考虑了叶片次级散射时，截获到光强的面元数等于总面元数。

对于每个波段，冠层截获的次级散射占冠层截获的直接辐射的比例随着太阳高度角的降低逐渐减小；叶片散射对冠层光分布的影响与波长有关。从表 2 可以看出，在近红外波段，叶片次级辐射对玉米冠层截光率的影响在 10.0% 左右，红光波段在 1.0% 左右，绿光波段在 4.4% 左右。

表 2 冠层近红外、红光及绿光波段吸收情况

Table 2 Canopy interception in infrared, red and green waveband

| 波段 | 太阳高度角/ $^{\circ}$ | 截获到直接辐射的面元率/% | 截获到直接与次级辐射的总面元率/% | 总次级散射与投射的光强之比 ^① /% | 吸收的次级散射与总投射光强之比 ^② /% | 吸收的次级散射与直接辐射之比/% |
|-----|-------------------|---------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|
| 近红外 | 90 | 38.2 | 100 | 91.0 | 0.9 | 10.5 |
| | 60 | 50.5 | 100 | 91.0 | 0.9 | 10.0 |
| | 30 | 39.9 | 100 | 91.0 | 0.8 | 9.1 |
| 红光 | 90 | 38.2 | 100 | 8.6 | 1.0 | 1.1 |
| | 60 | 50.5 | 100 | 8.6 | 0.9 | 1.0 |
| | 30 | 39.9 | 100 | 8.6 | 0.8 | 0.9 |
| 绿光 | 90 | 38.2 | 100 | 40.0 | 2.8 | 4.6 |
| | 60 | 50.5 | 100 | 40.0 | 2.6 | 4.4 |
| | 30 | 39.9 | 100 | 40.0 | 2.4 | 4.0 |

注：①表示冠层产生的总的叶面散射与投射的总光强之比；②表示在冠层产生的叶面散射中被叶片吸收的部分与投射总光强之比。

4.3 讨论

在理想情况下，不考虑大气对天空辐射的吸收和散射引起的能量损失，即直接辐射与天空散射总强度相同情况下，有天空散射时冠层截光量大于只有直接辐射时的截光量。这是由于天空散射入射方向较多，每个面元均能接受到光照；直接辐射时，由于叶片之间的遮阴效果明显，下部叶片大多处于上部叶片的阴影中，导致接收到光的叶面积较少。

在阴天情况下，由于大气云层对天空辐射的吸收和反射，相当一部份的天空辐射没有到达地面，因此晴天到达地面的辐射强度大于阴天。本文中的天空环境为晴天（包含 10% 天空散射）以及全阴天（100% 天空散射）。阴天时冠层有超过一半的面元截获光强大于晴天时截获的光强。

由于叶片对入射光的散射作用，可以使更多的叶片截获到光辐射，因此叶片次级散射增大了冠层的受光面积，以提高冠层对光辐射的利用率。冠层对各个波段的光截获量的多少由冠层结构、叶片光谱特性等因素确定。本文使用的冠层对绿光波段的次级辐射截获量最大，占总投射光的 2.6% 左右，近红外光最小，占 0.9% 左右。这是因为虽然近红外的散射率较大，但吸收率小，导致冠层对次级散射截获较小，红光吸收率大，但是散射率小，

所以对次级散射截获量相对于绿光而言较小。冠层对直接辐射的截获根据吸收率的大小确定, 红光波段接近 0.91, 所以对红光的截获量最大。

次级散射对冠层光分布的影响随着反射和透射率的增加而增加, 反射和透射率越高, 冠层截获的次级辐射占冠层结果的总光强的比例越高, 其中近红外高达 10% 左右。对于反射和透射率较大的波段, 叶片次级辐射的影响不能忽视。

5 结 论

通过模拟冠层的光分布, 得到如下结论:

1) 相同辐射强度时, 冠层截获的光强与受到照射的面元率在天空散射时都比直接辐射时大; 当太阳高度角小于 60° 时, 冠层在阴天截获的总光强小于晴天, 但至少 60% 的叶片在阴天截获的光强大于晴天时截获的光强;

2) 叶片散射对冠层光分布的影响与波长有关, 在模拟的红光 (650 nm)、绿光 (540 nm) 和近红外 (760 nm) 波长中, 叶片次级辐射对玉米冠层截光率的影响在近红外最大, 绿光其次, 红光最小。

冠层内的光分布决定了叶片的光合产量和作物的生长形态, 因此, 冠层截光率决定了植物的生物物理过程, 是植物冠层光合生产力及光环境模拟研究的重要基础。

[参 考 文 献]

- [1] Goudriaan J. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 43(10): 155—169.
- [2] Norman J, Arkebauer T. Predicting canopy light use efficiency from leaf characteristics[J]. *Agronomy Monographs*, 1991, 31(10): 125—143.
- [3] Choudhury B J. A sensitivity analysis of the radiation use efficiency for gross photosynthesis and net carbon accumulation by wheat[J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 101(9): 217—234.
- [4] Zheng Bangyou, Ma Yuntao, Li Baoguo, et al. Assessment of the influence of global dimming on the photosynthetic production of rice based on three-dimensional modeling[J]. *Science China:Earth Sciences*, 2011, 54(2): 290—297.
- [5] Gu L-H, Baldocchi D, Black T A, et al. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(3): 1—23.
- [6] Alton P B, North P, Kaduk J, et al. Radiative transfer modeling of direct and diffuse sunlight in a Siberian pine forest[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(12): 1—13.
- [7] Brodersen C R, Vogelmann T C, Gorton H L, et al. A new paradigm in leaf-level photosynthesis: direct and diffuse lights are not equal[J]. *Cell and Environment*, 2008, 31(10): 159—164.
- [8] Seishi, IsoBe. Theory of the light distribution and photosynthesis in canopies of randomly dispersed foliage area[J]. *Agr Sci*, 1969, 16(2): 1—23
- [9] Wang Quan, Tenhunen J, Schmidt M, et al. Diffuse PAR irradiance under clear skies in complex alpine terrain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 12(9): 1—15.
- [10] Castro F, Fetcher N. Three dimensional model of the interception of light by a canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90(11): 215—233.
- [11] Bird R, Riordan C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1986, 25(3): 87—97.
- [12] Andrieu B, Baret F, Jacquemoud S, et al. Evaluation of an improved version of SAIL modl for simulating bidirectional reflectance of sugar beet canopies[J]. *Elsevier*, 1997, 60(7): 247—257.
- [13] 何荣, 杨春宇. CIE 天空亮度分布新标准[J]. *照明工程学报*, 2007, 18(2): 1—4.
He Ying, Yang Chunyu. New CIE standard for sky luminance distribution[J]. *Zhaoming Gongcheng Xuebao*, 2007, 18(2): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [14] Grant R H, Heisler G M, Wei G. Photosynthetically-active radiation:sky radiance distributions under clear and overcast conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 82(5): 267—292.
- [15] Grant R H. The influence of sky radiance distribution on the flux density in the shadow of a tree crown[J]. *Agric Forest Meteorol*, 1985, 35(2): 59—70.
- [16] 王锡平, 郭焱, 李保国, 等. 玉米冠层内太阳直接辐射三维空间分布的模拟[J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 7—12.
Wang Xiping, Guo Yan, Li Baoguo, et al. Modeling the three dimensional distribution of direct solar radiation in maize canopy[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2005, 25(1): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [17] Michael C. Could plant leaves be treated as Lambertian surfaces in dense crop canopies to estimate light absorption?[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 198(4): 219—228.
- [18] Maria L E, Baret F, Aries F, et al. Modeling maize canopy 3D architecture application to reflectance simulation[J]. *Ecological Modelling*, 1999, 122(4): 25—43.

Effect of sky radiation and leaf scattering on maize canopy light interception by 3D modeling

Kong Ya, Lao Cailian^{*}, Cao Suyun

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In this study, we utilized Parallel Monte-Carlo Ray-tracing model to quantify the effect of sky radiation and leaf scattering on canopy light interception. The simulation showed that more light intercepted by canopy and more leaves irradiated by sky light in diffuse radiation than in direct radiation with equal total radiant flux. When solar elevation is lower than 60°, canopy got more irradiance in clear sky than in overcast, while there was at least 60% of leaves got more irradiance in overcast than in clear sky. It was also manifested that the influence of leaf scattering on canopy light distribution was related with the wavelength of light. We simulated the light distribution in red (650 nm), green (540 nm) and infrared (760 nm) and found that the influence of leaf scattering on canopy light interception was largest in infrared, smaller in red, the smallest in green. These results can provide basic references for the research of plant canopy photosynthetic productivity and light environment simulation.

Key words: radiation, diffusion, scattering, three dimensional computer graphic, computer simulation, sky radiation, leaf scattering, canopy light interception