

使用 FastTracer 光线追踪软件模拟计算冠层光分布

什么是冠层光分布？为什么需要光线追踪模拟计算？

光照射到作物冠层上并被植物叶片吸收，由于植物叶片之间相互遮挡导致光在冠层内各个叶片上的光强差异巨大，植物冠层内每个叶片（或其它器官）上的光强就是光分布。光强在冠层内从上到下整体上呈现指数递减趋势，但是对于同一高度的不同叶片，其实际光强也存在很大差别。使用简单的公式表述的冠层光分布存在较大误差，因此，需要使用光线追踪软件 FastTracer 对 3D 冠层模型进行光线模拟计算，已获得较为精准的每片叶子吸收的光强。光线追踪模拟计算是三维冠层光合模型的第二部分，其第一部分是构建三维结构模型，第二部分是光线追踪，第三部分是叶片等器官的光合模型。

可以用于哪些作物？

光线追踪软件 FastTracer 可以用于任何植物的三维冠层模型的光线模拟。该软件首次发表在(Song et al, 2013)中，已经在多篇文献中应用，其中包括的作物有水稻、小麦、大豆、烟草、甘蔗等。光线追踪模拟还可以很多其它植物上应用，如：玉米、高粱、杨树、拟南芥、蔬菜、果树等。针对的植物模型不仅包括使用 mCanopy 软件包构建的三维冠层模型，也可以通过立体相机成像、激光扫描等技术获取的植物三维模型（其模型文件格式需要根据 FastTracer 规定的格式来做响应的转换）。

如何运行 FastTracer？

FastTracer 是在命令行下运行的控制台软件（无图形用户界面）。将 FastTracer 软件下载到本地后不需要安装操作，打开 Windows 8 或 Windows 10 自带的 Windows PowerShell 窗口（或低版本 Windows 操作系统自带的“命令提示符”窗口）并在其中运行 FastTracer 软件。

请先在 PowerShell 窗口中使用“cd..”“cd 目录名”“ls”等命令进入到 FastTracer 软件所在目录下（关于 Powershell 的基本使用这里不做介绍），然后尝试运行下列命令。

运行命令（1）：

```
.\FastTracer.exe
```

运行软件时在后面不加任何参数，FastTracer 会输出软件版本等基本信息如下：

```

PS D:\OneDrive\fastTracer\mCanopy and FastTracer\FastTracer beta 1.0> .\fastTracerV1.22.exe
*****
FastTracer, Version V1.22 (2021-10-20)
A ray tracing software for plant canopy light simulation
developed by Prof. Xin-Guang Zhu's Lab
CAS Center for Excellence in Molecular Plant Sciences
Institute of Plant Physiology and Ecology, Chinese Academy of Sciences
Contact: Dr. Qingfeng Song, songqf@cemps.ac.cn
*****

-T    for TEST run (try this first as: FastTracer.exe -T)

-D    Dimension, min_x max_x min_y max_y min_z max_z
-L    Latitude
-S    Solar time noon
-A    Atmospheric transmittance
-d    Day of year
-W    Whole day simulation, start time (hour) interval (hour) end time (hour)
-h    Time (hour)
-n    Light nearest distance
-m    Model filename
-o    Output filename
-t    Leaf transmittance
-r    Leaf reflectance
-s    Silence
-C    Climate filename
-z    Cell Size (unit: cm)
-R    Rand seed
-BRDF_n BRDF's model n parameter
-BRDF_K BRDF's model K parameter
-BRDF_rho BRDF's model rho parameter

Please refer to the user manual for more information! Thank you for using FastTracer!
Solar light direction: X-> north, Y->west, Z->up; the canopy orientation of 3D model should be the same!

```

运行命令 (2):

```
.\FastTracer.exe -T
```

运行软件时在后面加“-T”，这时软件以默认参数值和软件自带的测试模型文件为输入，进行测试运行。软件会输出所有默认参数的数值，并开始进行全天的不同时刻的光线追踪模拟计算。

```

PS D:\OneDrive\fastTracer\mCanopy and FastTracer\FastTracer beta 1.0> .\fastTracerVS2019.exe -T
----- FastTracer will use the parameter values as following: -----
-D    Dimension, X: 0 ` 20    Y: 0 ` 25    Z: 0 ` 150
-L    Latitude    30
-S    Solar time noon 12
-A    Atmospheric transmittance    0.7
-d    Day of year    120
-W    Whole day simulation, start time (hour): 6    interval (hour): 1    end time (hour): 18
-h    Time (hour) (NA)
-n    Light nearest distance 0.1
-m    Model filename modelFile.txt
-o    Output filename outputFile.txt
-t    Leaf transmittance    0.075 (7.5%)
-r    Leaf reflectance    0.075 (7.5%)
-s    Silence 1
-C    Climate filename    (NA)
-z    Cell Size (unit: cm) 1
-R    Rand seed 0
-BRDF_n BRDF's model n parameter    1.77
-BRDF_K BRDF's model K parameter    0.05
-BRDF_rho BRDF's model rho parameter    0.25
----- Run FastTracer with TEST model! -----
calculate or load climate data ...
import canopy model ...
10/20/21 14:50:04
6 h, Direct light ray tracing ...
10/20/21 14:50:06
6 h, Diffuse light ray tracing ...
10/20/21 14:50:06
10/20/21 14:50:06
7 h, Direct light ray tracing ...
10/20/21 14:50:08
7 h, Diffuse light ray tracing ...
10/20/21 14:50:10
10/20/21 14:50:10
8 h, Direct light ray tracing ...
10/20/21 14:50:11
8 h, Diffuse light ray tracing ...
10/20/21 14:50:13

```

最后，软件会把模拟得到的所有叶片在每个时刻的光强数据输出到文件“outputFile.txt”中，可以在 Excel 中查看，其具体格式见下文。

运行命令 (3):

```
.\FastTracer.exe -D -10 20 -5 30 0 100 -L 21
```

运行软件时在后面加“-D”并随后输入 6 个数值（-10 20 -5 30 0 100），表示将软件模拟空间范围设置为 X 方向为-10~20，Y 方向为-5~30，Z 方向为 0~100。

运行软件时在后面加“-L”并随后输入 1 个数值（21），表示将软件模拟的纬度设置为 21 度。

同理，用户可以设置如下参数表中的全部或部分参数，例如：

运行命令 (4):

```
.\FastTracer.exe -D -10 20 -5 30 0 100 -L 21 -S 12 -A 0.5  
-d 249 -W 7 1 17 -n 0.1 -m modelFile.txt -o outputTESTFile.txt  
-t 0.075 -r 0.075 -s 1 -C weather2015-246-286.txt
```

注意！每次运行 FastTracer 软件时的参数设置仅对当次运行有效。

表 1. FastTracer 软件参数表

| 参数 | 参数名称 | 参数名称 | 参数个数 | 说明 |
|-----------|--------------------------|----------|------|---|
| -D | Dimension | 光线追踪空间范围 | 6 个 | 6 个数值包括 X 最小值、X 最大值、Y 最小值、Y 最大值、Z 最小值、Z 最大值 |
| -L | Latitude | 纬度 | 1 个 | 用来计算光线角度 |
| -S | Solar time noon | 太阳正午时间 | 1 个 | 用来校准当地时间 |
| -A | Atmosphere transmittance | 大气透射率 | 1 个 | 用来计算直射光和散射光比例 |
| -d | Day of year | 日 | 1 个 | 用来计算光线角度 |
| -W | Whole day simulation | 全天模拟 | 3 个 | 3 个数值是开始时间、间隔时间、结束时间 |
| -h | Hour | 时 | 1 个 | 单次模拟的时间，注意，不与-W 同时用 |
| -n | Light nearest distance | 光线间距 | 1 个 | 光线之间的间距 |
| -m | Model file | 3D 模型文件 | 1 个 | 3D 冠层结构模型，数据格式见下文 |
| -o | Output file | 输出文件 | 1 个 | 带有光强数据的 3D 冠层结构模型 |
| -t | Leaf transmittance | 叶片透射率 | 1 个 | 叶片的透射率 |

| | | | | |
|-----------|------------------|--------|-----|--------------------|
| -r | Leaf reflectance | 叶片反射率 | 1 个 | 叶片的反射率 |
| -s | Silence | 输出静默 | 1 个 | 当设置为 0 时屏幕输出模拟过程记录 |
| -C | Climate file | 气候数据文件 | 1 个 | 气候数据，数据格式见下文 |

3D 模型文件 (Model file) 的数据格式

FastTracer 软件输入的 3D 模型文件 (Model file) 的数据格式 (简称 FastTracer 数据格式) 如下:

FastTracer 数据格式中的每一行表示一个三角形面元, 这里的面元为空间三角形, 由三角形在空间中的 3 个顶点的 (x,y,z) 坐标表示。面元是模型中的最小单元, 植物的叶片、茎等都是由面元组成的。

FastTracer 数据格式中的第 1-5 列为编码: 第 1 列为单株编码, 第 2 列为分枝编码, 第 3 列为叶片编码, 第 4 列为面元在叶片的位置, 第 5 列为备用编码。

FastTracer 数据格式中的第 6-14 列为三角形面元顶点的坐标, $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$, 其中 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) 分别为三角形面元的三个顶点, 这里规定依据右手定则确定面元的正面 (用来规定叶片的正面, 即近轴面)

第 15-17 列为植株的生理参数, 第 15 列为叶片氮含量, 第 16 列为叶片透射率, 第 17 列为叶片反射率。其中氮含量可以用于后续计算光合速率时候使用, 透射率和反射率可以在光线追踪模拟时候作为输入参数。

使用 mCanopy 软件包构建的三维植物冠层模型是符合 FastTracer 数据格式的, 可以直接用于 FastTracer 软件模拟时的 3D 模型文件。

输出文件 (Output file) 的数据格式

FastTracer 软件模拟输出文件 (Output file) 的数据格式如下:

输出文件数据的第 1 列至第 17 列符合 FastTracer 数据格式, 即与输入文件相同。而第 18 列为三角形面元的面积, 第 19 列及之后为三角形所吸收的光量子通量密度 (PPFD) (可以理解为光强)。

输出文件的第 1 行为标题行, 标明了每一列的名称。第 2 行及之后的每一行表示一个三角形面元, 并且这里输出的三角形面元是处于 FastTracer 模拟参数设置 (-D) 的空间范围内的全部三角形面元。

气候文件 (Climate file) 的数据格式

FastTracer 软件模拟时可以选择从气候文件 (Climate file) 中输入光强数据。气候文件的数据格式如下:

气候文件数据的第 1 列为年份, 第 2 列为一年中的第几天, 第 3 列为小时, 第 4 列为气温, 第 5 列为空气相对湿度, 第 6 列为总光 (直射+散射) 光量子通量密度 (PPFD), 第 7 列为散射光量子通量密度 (PPFD)。FastTracer 软件根据参数 Day of year 及时间 (小时) 来查询文件中的直射光和散射光的光量子通量密度数据, 用于光线追踪模拟时的环境光强。

气候文件数据中的气温、空气相对湿度数据在 FastTracer 中不使用。

如何将其它模型数据格式转为 FastTracer 数据格式?

使用多视角相机、立体相机、激光雷达、激光扫描等方式对植物进行三维重建, 一般都可以获得空间点云数据。用户需要对点云数据进行处理, 获得三角形面元数据, 即: 把相邻的点连接成面的过程。最后, 把获得的三角形面元数据的格式转换为 FastTracer 数据格式中的第 6-14 列, FastTracer 数据格式的第 1-5 列和第 15-17 列可以用 0 补全。

FastTracer 数据格式的第 1-5 列为植株编码、分蘖编码、叶片编码等信息, 在使用 FastTracer 光线追踪模拟过程中不使用。这些编码在后续数据分析中很有帮助。

mCanopy 软件包构建的三维冠层模型文件是 FastTracer 光线追踪模拟所需输入的文件。FastTracer 软件是采用 C++编写的, 其不同版本分别可以在 Windows, Linux 平台上运行的专门用于植物冠层光线追踪模拟计算的软件。

参考文献及已发表的应用有哪些?

FastTracer 软件参考文献:

- Song Q, Zhang G, Zhu X-G. 2013. Optimal crop canopy architecture to maximise canopy photosynthetic CO₂ uptake under elevated CO₂- a theoretical study using a mechanistic model of canopy photosynthesis. *Functional Plant Biology* 40, 109–124.

FastTracer 软件在如下文献中应用:

- Liu, F., Song, Q., Zhao, J., Mao, L., Bu, H., Hu, Y., Zhu, X.G., 2021. Canopy occupation volume as an indicator of canopy photosynthetic capacity. *New Phytol.* <https://doi.org/10.1111/nph.17611>
- Song Q, Wang Y, Qu M, Ort DR, Zhu X-G. 2017. The impact of modifying photosystem antenna size on canopy photosynthetic efficiency - development of a new canopy photosynthesis model scaling from metabolism to canopy level processes. *Plant, Cell & Environment* 40, 2946–2957.
- Song Q, Srinivasan V, Long S, Zhu X-G. 2019. Decomposition analysis on soybean

productivity increase under elevated CO₂ using 3D canopy model reveals synergistic effects of CO₂ and light in photosynthesis. *Annals of Botany*, mcz163

- Song Q, Xiao H, Xiao X, Zhu X-G. 2016. A new canopy photosynthesis and transpiration measurement system (CAPTS) for canopy gas exchange research. *Agricultural and Forest Meteorology* 217, 101–107.
- Wang Y, Song Q, Jaiswal D, P. de Souza A, Long SP, Zhu X-G. 2017. Development of a three-dimensional ray-tracing model of sugarcane canopy photosynthesis and its application in assessing impacts of varied row spacing. *Bioenergy Research* 10, 626–634.
- Burgess AJ, Retkute R, Herman T, Murchie EH. 2017. Exploring relationships between canopy architecture, light distribution, and photosynthesis in contrasting rice genotypes using 3D canopy reconstruction. *Frontiers in plant science* 8, 734.
- Burgess AJ, Retkute R, Pound MP, Foulkes J, Preston SP, Jensen OE, Pridmore TP, Murchie EH. 2015. High-resolution three-dimensional structural data quantify the impact of photoinhibition on long-term carbon gain in wheat canopies in the field. *Plant Physiology* 169, 1192–1204.
- Shi Z, Chang T-G, Chen G, Song Q, Wang Y, Zhou Z, Wang M, Qu M, Wang B, Zhu X-G. 2019. Dissection of mechanisms for high yield in two elite rice cultivars. *Field Crops Research* 241, 107563.
- Chang T, Zhao H, Wang N, Song Q, Xiao Y, Qu M, Zhu X. 2019. A three-dimensional canopy photosynthesis model in rice with a complete description of the canopy architecture, leaf physiology, and mechanical properties. *Journal of Experimental Botany* 70, 2479–2490.

知识产权

FastTracer 软件学术用途使用免费，直接使用、作为模块开发其它软件后使用、或使用其计算结果的用户，在发表相关论文论著时请引用上述参考文献。如商业用途使用，须取得授权，对于侵犯知识产权的行为，作者及所在单位保留追究其法律责任的权利。