

利用计算虚拟测 评价相邻树木对单株树木的 光辐射遮蔽

(张沛东¹ 张晓媛² 苏志强² 闫飞^{1*})

(1. 北京林业大学林学院 北京 100083; 2. 北京化工大学材料科学与工程学院 北京 100029)

摘要:【目的】计算虚拟测量(CVM)是一种虚拟测量方法,旨在虚拟空间的森林样地中对虚拟树木发起仿真测量用于获取树木某些在现实空间中不易测量的生物参量。本文应用了CVM方法,其主要方法是通过构建虚拟样地(VSP),定量评价相邻树木对单株树木的阳光辐射遮蔽的程度。【方法】首先利用Voxel和QSM方法,结合DTM和虚拟阳光辐射模拟软件,构建VSP,进而对处于VSP正中央的两颗被相邻树木遮蔽的目标树木进行基于6个物理遮蔽场景下的光照条件变化研究。此外,我们还比较了单棵树与虚拟样地整体之间的差异,以确定其邻域中单棵树的遮荫效果。【结果】研究表明,在不同的树体条件和树体模型下,虚拟样地中心树木的太阳能损失量在35.80%到45.32%之间。具体来说,不同的树体高度、树冠宽度和树叶密度等因素都会影响太阳能的损失量。【结论】我们的研究为定量评估森林中树木的遮荫效应开辟了一条新的途径,并为今后的树木生理学研究提供了有益的参考。通过虚拟测量方法,可以更准确地模拟和分析真实森林环境中的光照条件和树木生长状况。这不仅有助于提高对森林生态系统的理解,还可以为森林管理和保护提供科学依据。本研究证明了CVM方法在模拟和分析森林光照条件方面的有效性和潜力。未来,我们将继续完善这一方法,进一步探索其在不同森林生态系统中的应用。

关键词: 计算虚拟测量; 虚拟样地; 光照条件; 遮荫效应

Evaluating the shading of sunlight on individual trees by neighboring trees using virtual measurement calculations

(Zhang Peidong¹ Zhang Xiaoyuan² Su Zhiqiang² Yan Fei^{1*})

(1.College of Forestry, Beijing Forestry University Beijing 100083; 2. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology Beijing 100029)

Abstract: Objective: Virtual measurement (CVM) is a virtual measurement method that aims to perform simulated measurements on virtual trees in virtual forest plots to obtain certain biological parameters of trees that are difficult to measure in real space. In this paper, the CVM method is applied to quantitatively evaluate the extent to which neighboring trees shade individual trees by constructing a virtual plot (VSP). **Methods:** First, the VSP was constructed using the Voxel and QSM methods, in combination with DTM and virtual solar radiation simulation software. Subsequently, a study was conducted on the changes in light conditions under six physical shading scenarios for two target trees located in the center of the VSP that were shaded by neighboring trees. In addition, the differences between a single tree and the overall virtual plot were compared to determine the shading effect of a single tree in its neighborhood. **Results:** The results showed that the solar energy loss of the central trees in the virtual plot ranged from 35.80% to 45.32% under different tree conditions and tree models. Specifically, factors such as tree height, crown width, and leaf density all affected the amount of solar energy loss. **Conclusion:** Our research opens up a new avenue for quantitatively assessing the shading effect of trees in forests and provides useful references for future studies on tree physiology. Through virtual measurement methods, it is possible to more accurately simulate and analyze the light conditions and growth conditions of trees in real forest environments. This will not only help to improve our understanding of forest ecosystems but also provide scientific basis for forest management and protection. This study demonstrates the effectiveness and potential of the CVM method in simulating and analyzing forest light conditions. In the future, we will continue to improve this method and further explore its application in different forest ecosystems.

Key words: Computational Virtual Measurement; Virtual Sample Plot; Light Conditions; Shading Effect

1. 简介

树木是森林的基本组成部分, 树木作为个体进而共同形成一个庞大的聚落, 这一聚落不仅是植物的家园, 也是森林的主体。森林的演替过程依赖于每棵树木的生长策略, 而这种策略体现了树木的生物学特性[1]。环境因素和生长竞争作为主要驱动力, 共同作用于森林生长变化和演替等基本过程[2-4]。在环境因素中, 对树木生长有主要影响的环境因子有二氧化碳、水、原料矿物、光能资源、氧气和适宜温度等[2]。这些因子中任何一个的缺失都会对树木的生长造成环境胁迫, 同时树木也会产生相应的应激[5]。将环境胁迫与树木的应激联系进行关联分析, 是一个研究树木生长的主流的研究手法。例如, 一些研究调查了空气污染[6, 7]对树木产生的生物化学变化。

在生长竞争方面, 水和光被确定为树木为了获得生长优势竭力获取的两种主要资源 [5, 8, 9]。相关的研究为了获取这两种环境参量, 分别使用了不同的仪器。在树木对水分的利用方面, 通常在距目标树木不同深度和距离的地表下安装传感器。例如, Livesley 等人在 10 个深度应用综合分布的中子探针测量土壤含水量, 并在 110 天内每周重复测量[10]。除了野外直接测量外, 实验室测量也被采用, 如 Jia 等人采用烘干法测量土壤含水量[11]。这两种方法有一个共同点, 即都是直接记录自然环境参数。第一种方法的优点是它可以连续监测对象。第二种方法的优点是实现了高精度的测量。

在树木对光照的利用方面, 光合光子通量密度(PPFD)是评价树木[12,13]光照条件的常用指标。为了获取 PPFD, 一般来说, 传感器被放置在树冠上方以接收太阳辐射[14]。与土壤水分条件的测量相比, 光照条件的测量要复杂得多, 因为在露天环境中存在更多的变量[15]。除自然环境外, 森林中单木的光照条件还受其自身结构和周围树木的影响[16]。冠层下 PPFD 的测量是[17, 18]的常用方法。与在树冠上方安装辐射传感器相比, 存在的问题较少。首先, 冠层不是一个均匀分布的体。因此, 传感器的不同位置会导致不同的读数。其次, 林下传感器无法区分光衰减的来源, 无法形成自己的树木结构或邻近树木。

树木对光照竞争的主要生长策略是在垂直和水平方向上扩展冠层结构[19]。在森林中, 每棵树木(甚至叶片和树枝)都会向环境中产生阴影, 同时, 受到环境阴影的影响。在森林尺度上林荫的影响已被广泛研究[20-22]。Giday 等分析了 3 种郁闭度下遮阴水平对栽植树存活和生长的影响[8]。利用人工遮光, Vanhovea 等人研究了树木阴影与农业作物之间的正相关关系[23]。在不同的地块种植或不种植遮荫树作为农林复合处理。阴影和无阴影之间没有进行定量比较。这种影响是用一个间接的参数, 即作物产量来表示的。Ashton 等人证明了遮荫对树木幼苗叶片结构和生理的影响[24]。每株幼苗设置 4 个遮阴处理。这 3 个研究有一个相似之处, 都是关注树木遮荫的结果, 并没有对其原因进行量化分析, 以找到太阳能损失与它们的主要目标之间的关系。我们假设的原因是没有工具来分析森林中单个树木水平上的阴影效应。

如前所述, 目前的方法不具备区分树冠下光衰减来源的能力。在之前的研究中, 我们提出了一种基于压实虚拟测量(CVM)的日照分析方法。CVM 旨在模拟真实的测量工具如何在虚拟空间中进行测量。对于日照分析, 我们在树木模型上处处放置虚拟辐射传感器并接收虚拟日照, 避免了静态采样过程, 并且不受自然环境中许多随机变量的影响。在本研究中, 我们在激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)采样的森林样地上扩展了 CVM 方法。最后, 我们实现了对单棵树木被邻近树木遮挡程度的定量评估。

2. 材料与方法

2.1 TLS样地扫描

研究使用了合作伙伴 FGI 在芬兰进行的 TLS 样地扫描, 这些数据在互联网进行公开[25]。研究使用的 TLS 数据在 2014 年 4、5 月间采用徕卡 HDS6100 型扫描仪(徕卡测量系统 AG, 瑞士 Heerbrugg 公司)进行 TLS 野外扫描。扫描仪发射波长为 650~690 nm 的连续波用于测距。视场角设置为 $360^{\circ} \times 310^{\circ}$ 。在距离 LiDAR 传感器 25m 处, 测距精度为 $\pm 2\text{mm}$ 。扫描模式设置为 High Density 模式。水平和垂直方向的角度增量均为 0.036° 。因此, 在距离扫描位置 25m 处, 点间距为 15.7mm。

样地为芬兰埃沃南部北方森林的长方形森林样地, 面积为 $32\text{ m} \times 32\text{ m}$, (61.19°N , 25.11°E)。主

要树种有苏格兰松(樟子松(*Pinus sylvestris* L.))、挪威云杉(挪威云杉 L. Karst.)和银色(垂枝白桦)以及矮小的(毛桦(*Betula pubescens* Ehrh.))桦木。树干密度约 600 株/公顷。该样地内共有 51 株树木。这方面的详细信息见我们先前的研究。

2.2 虚拟样地

CVM 过程主要有两个步骤,即建立特定的虚拟样地(VSP)和在虚拟样地中进行 CVM 过程。在本研究中, VSP 是真实森林样地在虚拟空间中的代表。首先 LiDAR 测量的数据为建立 VSP 的提供了基础的有关树木和环境的表型信息。由于原始的原始 LiDAR 数据是海量的、杂乱无章的点,需要在语义上构建树木。因此,我们应用了两种树木建模方法,即体素(Voxel)建模和 QSM 建模,将原始 LiDAR 数据转换为三维树木模型。在构建的整个 TLS 样地中,单株树木共计 51 株(胸径大于 3 cm)。由于计算机性能的原因,一台装有 Intel i5-3570K CPU 和精视 GT 640 图形卡的台式计算机不可能将日照分析应用于包含所有树木的 VSP。因此,根据各国主流森林资源清查工作中[26,27]样地的通常设置,我们创建了一个圆形的 VSP,它是整个样地的子集。

图 1 为 VSP 和全 LiDAR 的平面布置图。VSP 的形状为直径为 15m 的圆形。本研究选取 T27 和 T26 作为目标树进行日照分析。T27 用紫色六边形标记。树高 18.7 m,胸径 20.8 cm,为成年树。T26 用蓝色六边形标出。幼树,树高 7.9 m,胸径 5.4 cm。23 号、46 号、20 号、47 号、22 号、29 号用绿钻标出。这 6 种树木在 VSP 中对 T27 和 T26 起到了遮光障碍的作用。值得注意的是,29 号树位于 VSP 之外。但预计其色调将投射到 T27 上,并可能投射到 T26 上。因此,将 T29 纳入 VSP 并进行建模。用虚线标注的概念线将这 6 棵树连接起来。它们属于最邻近的树种组,投影在 T27 和 T26 上。我们使用体素建模方法为它们制作了树模型,这与我们之前的研究不同。我们使用体素建模方法为它们建立了树模型[28],这与我们之前的研究不同。树的建模过程在本节后面进行了展示。33 号树和 34 号树由于处于 T27 和 T26 的北部,未进行建模。18 号树没有被建模,因为它不属于最近的相邻组。

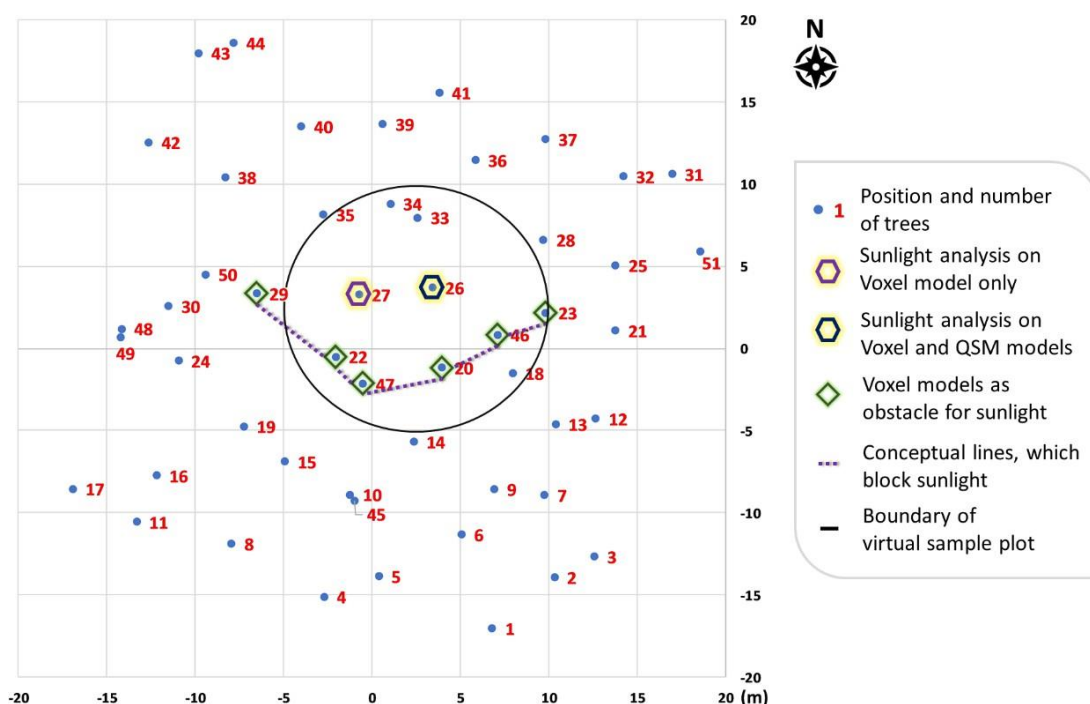


图.1 为日照分析准备的虚拟样地布设。

在本研究中,我们应用了两种树建模方法,体素建模和 QSM 建模。在我们之前的研究中,定量结构模型(quantitative structure models, QSM)建模被推荐。由于 QSM 模型可以通过目视检验进行验证,易于人工修

正, 且对树结构[29, 30]的预测较少。由于在 CVM 中, 虚拟空间中的树模型被视为真实树的拷贝, 因此对树结构的较少预测是非常重要的。理论上, 树模型的每个部分都应该位于真实树中。然而, 一个最小的预测树模型需要许多来自我们经验的条件, 例如, 冬季落叶季节, 非常低的森林密度和多个扫描位置。这些要求在一些天然林中很难满足, 例如我们的 TLS 扫描是在夏季密集的森林中进行的。因此, 我们在本研究中引入了体素建模方法。所有 8 棵树均采用体素法[28]制作。此外, 由于数据质量较好, 我们对 T26 进行了 QSM 建模。最后, 我们用八个树模型构建了 VSP。T27 和 T26 为日照分析的目标树。6 棵树被用作阳光阻隔剂。其他树木和林下植物被排除在 VSP 之外。

2.3 日照分析

在 VSP 成功安装后, 我们对 T27 和 T26 进行了日照分析, 这是 CVM 程序的第二步。日光分析是我们在前期研究中开发的一种方法。日照分析是一种 CVM 方法, 它提供了太阳能(通过直接例证)在完整树木表面上的时间和空间分布。与传统方法[2,12,31]相比, 阳光分析的关键特征是不受环境条件的干扰, 并在单个树木表面上提供详细信息。

图 2 展示了本研究中的 6 个场景。总的来说, 我们在有或没有邻近树木干扰的情况下进行了 6 次日照分析。图 2 (a)显示 T27 是 VSP 中唯一的目標。太阳光分析给出了在不接受环境遮阴的条件下, 太阳能的理论分布。然后, 我们导入周围的树木, 如图 2 (d)所示, 并对同一棵树再次进行日照。这一结果受到来自 6 棵障碍树和 T26 的遮荫的影响。最后, 我们应用两次日照分析的差值进行了样本计算, 以定量评估单棵树木在邻域遮荫下的能量损失。

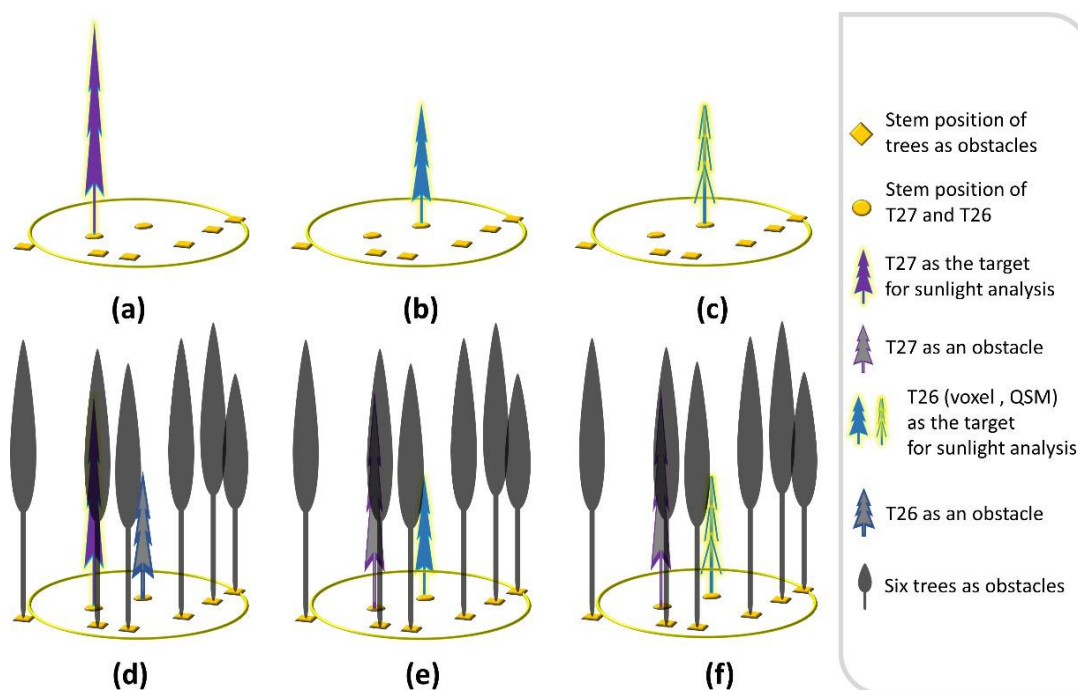


图.2 太阳光分析的六个场景: (a) 无邻近树木的 T27 (体素模型)日照分析; (b) 无邻近树木的 T26 (体素模型)日照分析; (c) 无邻近树木的 T26 (QSM 模型)日照分析; (d) T27 (体素模型)与邻近树木的日照分析; (e) 邻近树木的 T26 (体素模型)日照分析; (f) 邻近树木的 T26 (QSM 模型)日照分析。

与 T27 的日照分析类似。我们在 T26 上应用同样的方法, 使用 voxel 和 QSM 模型。QSM 模型是我们在前期研究中首先应用的建模方法。它存储了树木茎干和枝干结构的详细信息。与 QSM 模型相比, 体素模型刻画了主茎和冠层的离群点。虽然, 体素模型中的每个体素都是立方体, 并不能代表真实的叶片。然而, 作为每一片叶子的积累, 它修改了整个树冠。无论叶片在树冠中如何分布, 我们都将体元树冠模型视为一

个整体，足以起到阻挡太阳直接照射其他树木的作用。此外，T26 为我们提供了一个有价值的例子，即在不同的模型上应用相同的日照分析过程来代表同一棵树。因此，除了在有遮荫和无遮荫条件下进行比较外，还对两个模型在相同光照条件下进行了比较。

3. 结果

3.1 虚拟样地

图 3 显示了建立的 VSP。该 VSP 有 8 个体素树模型(不包括 T26 QSM 模型)，包含 2460262 条线和 1813 966 张面，在桌面计算机上消耗了大量的计算能力。为了更好的观察，图 3 的视角是由北向南的。图 3 所示的所有面孔在 CVM 过程中都不能被虚拟太阳光照射。如前所述，我们将 T26 体素模型替换为 QSM 模型，以比较不同建模方法中的日照分析。在此条件下，VSP 具有 7 个体素树模型和一个 QSM 树模型。

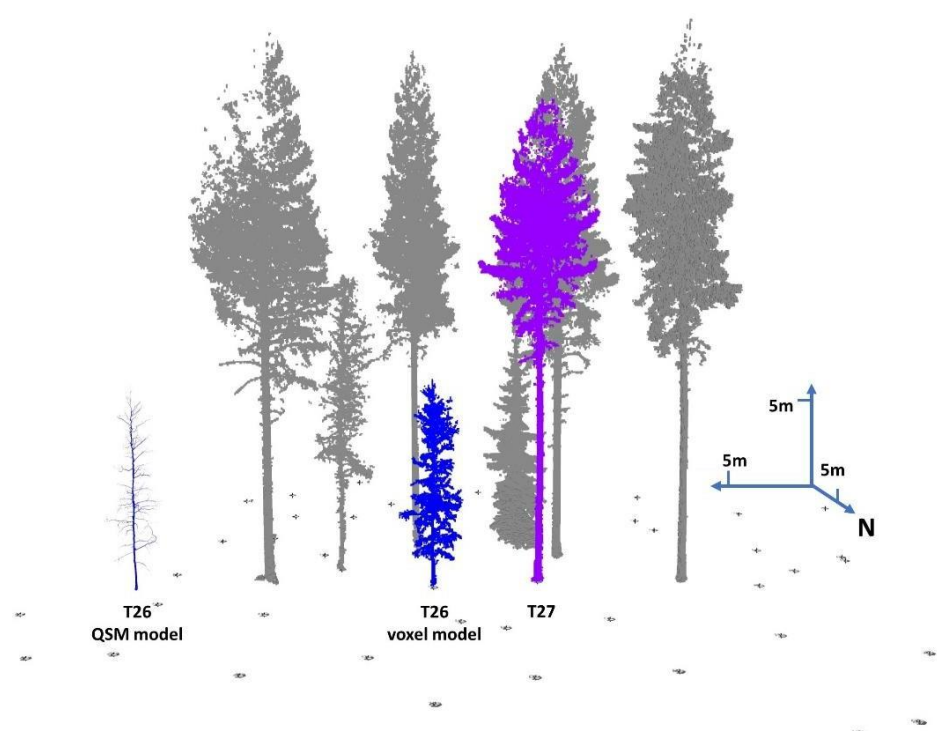


图.3 建立的虚拟样地.

3.2 针对六个场景的太阳光分析

对于每个场景，对光照条件进行了虚拟测量。表 1 显示了所有 6 个场景的静态输出。将具有相同辐照时间的树木表面的面积(3D 结果网格中的三角形)相加，以提供太阳能在树木表面的时间分布信息。此外，在表 1 中增加了面的数量。对于体素树模型，例如 a, b, d, e 组，0 - 1 组的面积值异常大。这是因为每个基本体素有六个面，并且在树表面下有许多体素。因此，这些体素中有相当数量的面不能被虚拟太阳光照射，将这些面在体素上的面积归为 0 ~ 1h 组。因此，0 - 1h 组的面积值并不能代表某一树木参数，如冠幅面积。

表.1 虚拟样地中 6 个场景的日照分析结果

Scenes	表面面积按辐照时间分类(m²)									网 格 中 的 三 角 形
	0-1h	1-2h	2-3h	3-4h	4-5h	5-6h	6-7h	7-8h	8h	
a	501.91	20.99	16.14	21.07	6.78	4.66	3.35	3.50	1.68	2081198
b	77.63	6.15	5.33	7.36	2.60	1.87	1.52	1.57	0.97	758991
c	1.09	0.27	0.34	0.19	0.28	0.14	0.10	0.21	0.04	560072

d	527.98	22.70	15.75	8.59	2.46	1.10	1.08	0.35	0.08	1440302
e	83.60	8.59	6.48	2.78	1.54	1.16	0.82	0.01	0.00	537462
f	1.35	0.45	0.29	0.25	0.14	0.15	0.05	0.00	0.00	368727

3.3 对于邻里遮阳的分析

表 2 显示了独立条件和 VSP 在光照条件上的差异。结果定量地显示了一棵树受相邻树影响的程度。乍看之下，T27 (场景 d - a)和 T26 (场景 e - d、f - c)在其三维结果网格中的三角形都有~ 30 %的显著损失。根据我们前期研究的认识，三角形的丢失说明 VSP 中的光照条件比单木单独条件下的光照条件简单。在模拟的每个步骤中，较大的阴影会覆盖树木表面较大的区域。被覆盖的树木表面具有相同的 0 值。如果阴影足够大，就会有一个相应的大而连续的区域。这个连续的区域不会被不同属性的三角形划分成更小的区域，因为它们共享相同的光照条件。最后，三角形的整体数量减少。

表 2 的主体部分给出了 T27 和 T26 的详细变化。受邻近树木遮阴的影响。T27 和 T26 对长暴露组都有较大的损失。将长暴露组的缺失区域增加到短暴露组。总体变化量为 0 和 0.01 m²，表明日光法的稳定性。结合表 1 中的信息，T27 在 7 - 8h 和 8h 的暴露组中都有正值，而 T26 在两种模型中几乎都为 0。这说明幼树在树冠下，没有机会获得全光照。与成龄树相比，其光照条件较差。

表.2 光照条件为单机条件和全 VSP 的差异。

Scenes	表面面积按辐照时间分类 (m ²)									三角 形的丢失
	0-1h	1- 2h	2- 3h	3-4h	4- 5h	5-6h	6-7h	7-8h	8h	
d - a	26.07	1.71	-0.38	-12.49	-4.32	-3.56	-2.27	-3.15	-1.60	30.79%
e - d	5.98	2.44	1.14	-4.57	-1.05	-0.71	-0.69	-1.57	-0.97	29.19%
f - c	0.26	0.18	-0.06	0.06	-0.14	0.00	-0.04	-0.21	-0.04	34.16%

表 3 是对表 2 的数学变换。为了更好的可读性，我们将绝对值转化为相对值，特别是对 T26 的两个树模型进行比较。正如先前所述(3.2)，存在体素面过度计数的问题。因此，我们采用变化面积绝对值的一半累加作为表 3 中每棵树(场景)的分母。因此，表 3 中的百分比表示的是所有变化区域所占的比例，而不是整个树面面积所占的比例。正号（无符号）表示该暴露组从其他组获得区域。负号（无符号）表示该暴露组是区域捐赠者。图 4 是表 3 的可视化。

表.3 单木日照分析与全 VSP 日照分析之间的面积转移。

Tree	按辐照时间分类的表面积								
	0-1h	1-2h	2-3h	3-4h	4-5h	5-6h	6-7h	7-8h	8h
T27	93.86%	6.16%	-1.37%	-44.97%	-15.55%	-12.82%	-8.17%	-11.34%	-5.76%
T26 voxel	62.55%	25.52%	11.92%	-47.80%	-10.98%	-7.43%	-7.22%	-16.42%	-10.15%
T26 QSM	52.53%	36.36%	-12.12%	12.12%	-28.28%	0.00%	-8.08%	-42.42%	-8.08%

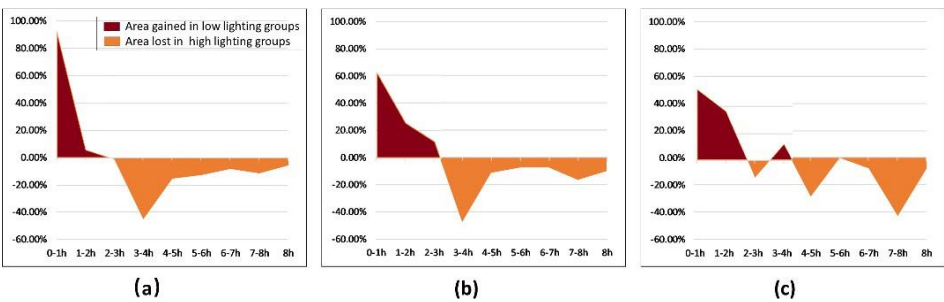


图4 单木日照分析与全 VSP 日照分析之间的面积转移; (a) T27 体素模型; (b) T26 体素模型; (c) T27 QSM 模型

在 CVM 过程中, 树模型是一个虚拟的太阳光接收器, 光照条件的变化导致太阳能的空间分布发生变化。表 3 和图 4 向我们展示了这种位移是如何在树的表面上发生的。此外, 太阳光分析的输出提供了时间信息, 也提供了空间信息。将这些信息结合起来, 就可以计算出单棵树由于相邻树荫造成的能量损失的精确值。表 4 为 T27 和 T26 的具体能量损失。直接辐射的平均功率每天都在变化。在表 4 中, 我们应用 0.11 kW / m² (61 N , 1 月 20 日)作为示范值。需要说明的是, 由于体素模型(3.2)的问题, 在确定一整天的总辐射能量时, 我们排除了每棵树在 0 - 1 组中的所有信息, 我们排除了每棵树在 0 - 1 组中的所有信息。

表 4. 评估单棵树木因邻体遮荫造成的能量损失

Trees		T27	T26 voxel	T26 QSM
表面类型分类 (按照射持续时间) (kWh)	0-1h	1.434	0.329	0.014
	1-2h	0.282	0.403	0.030
	2-3h	-0.105	0.314	-0.017
	3-4h	-4.809	-1.759	0.023
	4-5h	-2.138	-0.520	-0.069
	5-6h	-2.154	-0.430	0.000
	6-7h	-1.623	-0.493	-0.029
	7-8h	-2.599	-1.295	-0.173
	8h	-1.408	-0.854	-0.035
能量损失 (kWh)		-13.12	-4.31	-0.26
原始能量 (kWh)		28.95	10.97	0.71
损失率		45.32%	39.26%	35.80%

4. 讨论

4.1 对邻里遮阳造成的能量损失进行了理论测量

对阳光的竞争是森林中树木的主要生长策略[32]。从森林中单木的角度来看, 邻木的遮荫是光照条件的负面因素。因此, 能量损失的定量评估有助于许多研究领域, 如单木生物物理和森林动态[4, 22, 33]。在这项研究中, 我们提出了一种使用CVM的方法来研究由于邻域阴影而导致的单棵树的能量损失的幅度。该方法的关键特征是清晰地区分了同一棵树在两个场景下的光照条件。第一个场景是一个假设的场景。如图2 (a-c)所示, 树

木模型被安装在虚拟空间中。与森林[18, 34, 35]中无法隔离单棵树的真实测量相比, 虚拟空间中只有一棵树。因此, 可以确定单木在假设的单机条件下的光照条件。第二个场景是VSP, 旨在模拟森林中的真实样地。在VSP中再次应用相同参数的CVM, 确定了树木的真实光照条件。两个场景之间唯一的变量是树影, 它来源于周围的树木并投射到目标树木上。因此, 两个场景中光照条件的简单差异恰好反映了单棵树木如何受到相邻树木的影响。

4. 2体素和QSM模型在日照分析中的应用

在我们之前的研究中, QSM 建模方法是首选的。然而, 生产精细的 QSM 模型需要复杂的扫描设置以及良好的树形条件[30, 36]。在真实森林中应用了 TLS 扫描, 许多因素阻止了本研究中应用 QSM 建模的上层树木结构、茎密度和树木叶片的缺失。因此, 体素建模方法是一种可行的替代方法。对于所有树木, 制作了体素模型。其中一棵树, T26, 使用 QSM 方法建立树模型, 作为与 T26 体素模型比较。两个模型如图 3 所示。

体素树模型的普遍问题出现在 0-1 小时暴露组。该组中有两种类型的面(三角形)。第一类是被虚拟阳光照射的时间大于 0 分钟且小于 1 小时的面孔。第二类是没有被虚拟阳光照射的面孔。这种未被照亮的类型又可分为两个子类型。第一种是树面上的面孔。如 3.2 所述, 这些面孔不是树面, 但阳光分析软件 Sunshine_pro_2019[37]无法区分这些面孔。这也是Tab.1中0 - 1h暴露组面孔面积累积明显异常的原因。差分法是消除这些异常的主要数学工具。如表2所示, 0 - 1h暴露组的数值均来自于树表面的面孔。

图 4 (b , c)显示了 T26 的体素模型和 QSM 模型之间的差异。总体趋势一致, 如图(a)所示。但 2~3h 和 3~4h 暴露组有差异。表明接受转移的光照条件发生在更高的暴露组。根据我们以前的研究中提出的假设, 叶片可以被可视化为茎表面的覆盖膜。因此, QSM 模型也是一个带有叶子的初选树模型。与代表树的大纲的体素模型相比, QSM 模型反映了树的内部结构信息。因此, 复杂的 QSM 模型可能对光照条件的变化有更敏感的反应。

5. 结论

在前期研究的基础上[38], 我们将日照分析的空间范围扩展到样地水平。采用 6 种不同场景的 CVM 对光照条件进行分析。单木能量损失的评估由单木单独测量和全 VSP 测量之间的样本差异决定。结果报告了在绝对量和实际值中, 有多少太阳能被相邻的树木遮挡。我们的研究为定量评估森林中树木的遮荫效应开辟了一条新的途径, 并有利于未来树木生理学和森林动力学研究。

参考文献

1. Wunder, J.; Brzeziecki, B.; Żybyra, H.; Reineking, B.; Bigler, C.; Bugmann, H. Growth–mortality relationships as indicators of life-history strategies: A comparison of nine tree species in unmanaged European forests. *Oikos* **2008**, *117*, 815-828.
2. Kozłowski, T.T.; Pallardy, S.G. *Physiology of woody plants*. Elsevier: 1996.
3. Huante, P.; Rincón, E.; Chapin III, F.S. Foraging for nutrients, responses to changes in light, and competition in tropical deciduous tree seedlings. *Oecologia* **1998**, *117*, 209-216.
4. Cahill, J.F.; McNickle, G.G. The behavioral ecology of nutrient foraging by plants. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **2011**, *42*, 289-311.
5. Kozłowski, T.T. Light and water in relation to growth and competition of piedmont forest tree species. *Ecol Monogr* **1949**, *19*, 207-231.
6. Klumpp, G.; Furlan, C.M.; Domingos, M.; Klumpp, A. Response of stress indicators and growth parameters of *tibouchina pulchra* cogn. Exposed to air and soil pollution near the industrial complex of cubatão, Brazil. *Sci Total Environ* **2000**, *246*, 79-91.
7. Hoque, M.A.; Banu, M.N.A.; Okuma, E.; Amako, K.; Nakamura, Y.; Shimoishi, Y.; Murata, Y. Exogenous proline

and glycinebetaine increase nacl-induced ascorbate–glutathione cycle enzyme activities, and proline improves salt tolerance more than glycinebetaine in tobacco bright yellow-2 suspension-cultured cells. *Journal of plant physiology* **2007**, 164, 1457-1468.

8. Giday, K.; Aerts, R.; Muys, B.; Troyo-Dieguez, E.; Azadi, H. The effect of shade levels on the survival and growth of planted trees in dry afromontane forest: Implications for restoration success. *J Arid Environ* **2019**, 170, 7.

9. Dobbertin, M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: A review. *Eur J Forest Res* **2005**, 124, 319-333.

10. Livesley, S.J.; Gregory, P.J.; Buresh, R.J. Competition in tree row agroforestry systems. 3. Soil water distribution and dynamics. *Plant Soil* **2004**, 264, 129-139.

11. Jia, D.; Dai, X.; He, M. Polymerization of glutenin during grain development and quality expression in winter wheat in response to irrigation levels. *Crop Sci* **2012**, 52, 1816-1827.

12. Gendron, F.; Messier, C.; Comeau, P.G. Comparison of various methods for estimating the mean growing season percent photosynthetic photon flux density in forests. *Agr Forest Meteorol* **1998**, 92, 55-70.

13. Augspurger, C.K.; Kelly, C.K. Pathogen mortality of tropical tree seedlings: Experimental studies of the effects of dispersal distance, seedling density, and light conditions. *Oecologia* **1984**, 61, 211-217.

14. Mark, P.; Ashton, S. Some measurements of the microclimate within a sri lankan tropical rainforest. *Agr Forest Meteorol* **1992**, 59, 217-235.

15. Hassan, M.A.; Khalil, A.; Kaseb, S.; Kassem, M.A. Exploring the potential of tree-based ensemble methods in solar radiation modeling. *Appl Energ* **2017**, 203, 897-916.

16. Modrzyński, J.; Chmura, D.J.; Tjoelker, M.G. Seedling growth and biomass allocation in relation to leaf habit and shade tolerance among 10 temperate tree species. *Tree Physiol* **2015**, 35, 879-893.

17. Parent, S.; Messier, C. A simple and efficient method to estimate microsite light availability under a forest canopy. *Can J Forest Res* **1996**, 26, 151-154.

18. Fourier, A.; Bouchard, M.; Pothier, D. Effects of canopy composition and disturbance type on understorey plant assembly in boreal forests. *J Veg Sci* **2015**, 26, 1225-1237.

19. Iwasa, Y.; Cohen, D.; Leon, J.A. Tree height and crown shape, as results of competitive games. *J Theor Biol* **1985**, 112, 279-297.

20. Runkle, J.R. Gap regeneration in some old-growth forests of the eastern united states. *Ecology* **1981**, 62, 1041-1051.

21. Nicotra, A.B.; Chazdon, R.L.; Iriarte, S.V. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests. *Ecology* **1999**, 80, 1908-1926.

22. Gravel, D.; Canham, C.D.; Beaudet, M.; Messier, C. Shade tolerance, canopy gaps and mechanisms of coexistence of forest trees. *Oikos* **2010**, 119, 475-484.

23. Vanhove, W.; Vanhoudt, N.; Van Damme, P. Effect of shade tree planting and soil management on rehabilitation success of a 22-year-old degraded cocoa (*theobroma cacao* l.) plantation. *Agr Ecosyst Environ* **2016**, 219, 14-25.

24. Ashton, M.S.; GUNATILLEKE, C.S.; GUNATILLEKE, I.N.; Griscom, H.P.; Ashton, P.S.; Singhakumara, B.M. The effect of shade on leaf structure and physiology of tree seedlings from a mixed dipterocarp forest. *Botanical Journal of the Linnean Society* **2011**, 167, 332- 343.

25. Liang, X.; Hyypä, J.; Kaartinen, H.; Lehtomäki, M.; Pyörälä, J.; Pfeifer, N.; Holopainen, M.; Brolly, G.; Francesco, P.; Hackenberg, J., et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *Isprs J Photogramm* **2018**, 144, 137-179.

26. Zeng, W.; Tomppo, E.; Healey, S.P.; Gadow, K.V. The national forest inventory in china: History-results-international context. *For. Ecosyst.* **2015**, 2, 23.

27. Liang, X.; Kankare, V.; Hyypä, J.; Wang, Y.; Kukko, A.; Haggrén, H.; Yu, X.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Guan, F. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *Isprs J Photogramm* **2016**, 115, 63-77.
28. Bienert, A.; Hess, C.; Maas, H.-G.; Von Oheimb, G. A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* **2014**, 45.
29. Raunonen, P.; Kaasalainen, M.; Akerblom, M.; Kaasalainen, S.; Kaartinen, H.; Vastaranta, M.; Holopainen, M.; Disney, M.; Lewis, P. Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sens-Basel* **2013**, 5, 491-520.
30. Hackenberg, J.; Morhart, C.; Sheppard, J.; Spiecker, H.; Disney, M. Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data: A method description. *Forests* **2014**, 5, 1069.
31. Song, Q.; Xiao, H.; Xiao, X.; Zhu, X.-G. A new canopy photosynthesis and transpiration measurement system (capts) for canopy gas exchange research. *Agr Forest Meteorol* **2016**, 217, 101-107.
32. Belsky, A.J. Influences of trees on savanna productivity: Tests of shade, nutrients, and tree- grass competition. *Ecology* **1994**, 75, 922-932.
33. P. Adams, T.; W. Purves, D.; W. Pacala, S. Understanding height-structured competition in forests: Is there an r^* for light? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **2007**, 274, 3039-3048.
34. Watanabe, M.; Kitaoka, S.; Eguchi, N.; Watanabe, Y.; Satomura, T.; Takagi, K.; Satoh, F.; Koike, T. Photosynthetic traits of siebold's beech seedlings in changing light conditions by removal of shading trees under elevated CO_2 . *Plant Biol.* **2016**, 18, 56-62.
35. Olsoy, P.J.; Mitchell, J.J.; Levia, D.F.; Clark, P.E.; Glenn, N.F. Estimation of big sagebrush leaf area index with terrestrial laser scanning. *Ecol Indic* **2016**, 61, 815-821.
36. Liang, X.L.; Kankare, V.; Hyypä, J.; Wang, Y.S.; Kukko, A.; Haggren, H.; Yu, X.W.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Guan, F.Y., et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *Isprs J Photogramm* **2016**, 115, 63-77.
37. Wang, S. Revit 日照大师. <http://arc2dot.com/>
38. Wang, Z.; Shen, Y.-J.; Zhang, X.; Zhao, Y.; Schmullius, C. Processing Point Clouds Using Simulated Physical Processes as Replacements of Conventional Mathematically Based Procedures: A Theoretical Virtual Measurement for Stem Volume. *Remote Sens.* 2021, 13, 4627. <https://doi.org/10.3390/rs13224627>