

半椭球形树冠对冠层间隙率与聚集度指数的影响研究

王少腾^{1,2}, 耿君^{1,2}, 涂丽丽³, 尹高飞⁴

1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009;

2. 智能互联系统安徽省实验室, 合肥 230009;

3. 安徽农业大学 资源与环境学院, 合肥 230036;

4. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 成都 611756

摘要: 作为森林冠层结构的重要组成部分, 树冠形状对冠层间隙率与聚集度指数的计算有重要影响。之前的研究通常将树冠假设为圆锥形、圆柱形、圆锥+圆柱形等形状计算了冠层间隙率与聚集度指数。然而, 树冠生长受外部环境以及内部顶端优势等因素的影响, 相较于上述理想化的树冠形状, 半椭球形更符合树冠自然生长规律。事实上, 半椭球形是一种十分常见的树冠形状。本文以树冠在空间呈泊松分布为前提, 推导出半椭球形树冠的冠层间隙率与聚集度指数计算公式, 并进一步扩展到双半椭球形树冠。同时, 以半椭球形树冠为计算基准, 对比分析了半椭球形树冠与其他树冠形状冠层间隙率与聚集度指数的相对差异。模拟计算中主要输入参数包括树冠密度、树冠高度、树冠半径以及叶面积指数等。最后通过虚拟场景对结果进行验证。结果表明: (1) 半椭球形树冠与其他树冠形状的冠层间隙率有较大差异。随着观测天顶角增加, 不同树冠形状与半椭球形树冠的冠层间隙率的相对差异也逐渐增大。当观测天顶角为70°时, 圆锥形树冠与半椭球形树冠的冠层间隙率相对差异已接近100%。(2) 树冠形状对聚集度指数同样有较明显影响。极端情况下, 圆锥形树冠与半椭球形树冠的聚集度指数相对差异达到30%。(3) 半椭球形树冠与其他树冠形状的半球空间聚集度指数期望值的差异不容忽视。

关键词: 遥感, 树冠形状, 半椭球形树冠, 双半椭球形树冠, 冠层间隙率, 聚集度指数

引用格式: 王少腾, 耿君, 涂丽丽, 尹高飞. 2021. 半椭球形树冠对冠层间隙率与聚集度指数的影响研究. 遥感学报, 25(10): 2103-2115

Wang S T, Geng J, Tu L L and Yin G F. 2021. Influences of semiellipsoid-shaped crown on gap fraction and clumping index. National Remote Sensing Bulletin, 25(10): 2103-2115 [DOI: 10.11834/jrs.20219400]

1 引言

森林冠层的几何结构特征不仅直接影响森林截获太阳辐射的程度以及截留大气降水的能力等, 还影响到诸如风速、空气温湿度、土壤蒸发量、土壤热储量、土壤温度等林内小气候特征, 并影响到林冠和外界大气环境之间的能量交换 (Ellsworth 和 Reich, 1993; Parker 等, 1995; 李德志和臧润国, 2004)。因此, 森林冠层结构对于森林生态系统的研究有着重要意义。

冠层结构是树冠的形状、尺寸、分布等以及冠层内部各元素层次、结构等的集合 (Asner 等,

2002; Lefsky 等, 1999; Parker 等, 1995)。在植被遥感领域, 可以用冠层间隙率和聚集度指数来表示冠层的结构特征。Li 和 Strahler (1988) 将冠层间隙率定义为光子在冠层中由一点沿着一定方向到达另一点而未被叶片截获的概率, 冠层间隙率在植被覆盖区遥感影像解译中起着重要作用。通常情况下, 冠层内叶片表现为在空间中一定尺度的聚集性, Nilson (1971) 首先提出一个参数 Ω 来描述这一现象, Chen 和 Black (1992a) 将此参数称为叶片聚集度指数, 定义为有效叶面积指数与真实叶面积指数间的转换参数。聚集度指数是一个重要的植被冠层结构参数, 通过聚集度指数

收稿日期: 2019-10-31; 预印本: 2020-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41701383, 41801234); 安徽省自然科学基金(编号:1808085QD105)

第一作者简介: 王少腾, 1995年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为植被定量遥感。E-mail: wangshaoteng1995@163.com

通信作者简介: 耿君, 1988年生, 男, 讲师, 研究方向为植被定量遥感。E-mail: gengj@hfut.edu.cn

可以区分光照和阴影叶片,从而提高全球总初级生产力的估算精度(Chen等,2012);包含观测角度相关的聚集度指数可能会显著改善基于光学仪器的LAI测量(Lang和Xiang,1986;Chen和Cihlar,1995;Fournier和Hall,2017)。由此根据Lambert-Beer公式得到修正后的间隙率计算公式:

$$P(\theta) = \exp(-G(\theta) \cdot L \cdot \Omega(\theta) / \cos\theta) \quad (1)$$

式中, $P(\theta)$ 表示观测天顶角 θ 下的间隙率, $G(\theta)$ 是叶片的消光系数,即单位叶面积在垂直于观测方向的平面的平均投影系数, L 即叶面积指数,定义为每单位地面面积的总叶面积的一半(Chen和Black,1992b)。

作为离散冠层(如森林)的基本结构,树冠形状被很多学者所重视。在过去的几十年中,众多学者在树冠形状的基础上对冠层间隙率、聚集度指数和冠层反射率等进行深入研究。例如Li和Strahler(1985)的几何光学模型中将针叶树冠假设为圆锥形,依据此推导了圆锥形树冠的四分量计算,并且通过仿真模拟表明,树冠的三维几何可以很好地解释森林冠层的双向反射率分布函数BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)问题;Li和Strahler(1992)进一步将树冠假设为椭球形,研究了树冠形状对BRDF的影响问题,依此强调了目标物的形状、结构等对真实场景有重要影响;Chen和Leblanc(1997)认为将北方针叶林树冠假设为圆锥+圆柱形更为合适,依此提出四尺度几何光学模型;Chen等(2005)将针叶树种假设为圆锥+圆柱形,阔叶树种假设为椭球形分析了角指数(热点与暗斑的归一化差)与聚集指数之间的关系,并反演了全球范围的叶片聚集度指数;尹高飞等(2014)假设树冠为球形、圆锥形、圆锥+圆柱形等形状,研究了树冠形状对间隙率和聚集度指数以及真实叶面积指数估算的影响;耿君等(2016)假设树冠为椭球形,研究了树冠尺寸特征对冠层间隙率和聚集度指数的影响。除此之外,能够灵活设置单棵树冠形状以模拟森林冠层的计算机模拟模型也得到很好地发展,例如DART模型(Gastellu-Etchegorr等,2012)、RAPID模型(Huang等,2018)。在上述计算机模拟模型中,树冠形状是一个非常重要的输入参数,模型可以较为准确地模拟小尺度场景内的辐射传输过程。

上述学者研究了多种树冠形状,很好地揭示

了树冠形状对冠层间隙率与聚集度指数的重要影响。然而,上述研究所用到的树冠形状(圆锥形、圆柱形、圆锥+圆柱形、椭球形等)对树冠的抽象偏于理想化。例如,圆柱形假设树冠顶部与树冠基部拥有相同的半径,这显然是不符合实际的。事实上,受外界光照条件的影响,树冠侧枝随高度出现异速生长现象。这就导致树冠下部侧枝水平较长,上部接近顶端越短,以此接收更多的光照和水分(徐程扬,2001;Power等,2012)。圆锥形以及圆锥+圆柱形对圆柱形相较圆柱形有部分改进,但圆锥形对树冠侧面外轮廓是直线的描述仍有不足。通常情况下树冠外轮廓呈一定的弧形,而非直线(Borchert和Slade,1981;Deleuze等,1996;Hashimoto,1991;Kohyama,1980)。事实上,相对于上述树冠形状,半椭球形树冠是一种十分常见的树冠形状。在众多林学家对树冠形状的调查中也证明了这一点。例如,有学者提出的树冠形状预测模型使用冠幅、冠长等变量进行预测(Biging和Wensel,1990;Deleuze等,1996;Baldwin和Peterson,1997;李凤日,2004;Purves等,2007;Power等,2012),其预测结果可近似为半椭球形;很多树种随着树龄的增加,树冠逐渐向半椭球形过渡(Deleuze等,1996;姜志林和叶镜中,1980;李德志和臧润国,2004)。

树冠形状对冠层间隙率以及聚集度指数的影响不容忽视。定量分析树冠形状对冠层间隙率与聚集度指数产生的影响,对地面叶面积指数测量、离散冠层中二向反射模型的构建以及植被参数反演等具有重要意义。因此,在几何光学模型中需要对树冠形状进行更为准确地描述。在本文的研究中,推导了半椭球形树冠的冠层间隙率与聚集度指数的计算公式,并进一步扩展到双半椭球形树冠。同时,分析了不同树冠高度下,半椭球形树冠与其他树冠形状冠层间隙率与聚集度指数的差异,最后通过虚拟场景对结果进行验证。

2 理论与方法

本文对树冠以及冠层内叶片作以下假设:(1)由于土壤、水分等环境因子的随机性,以往的研究中往往将天然林中的树冠分布假设为泊松随机分布;(2)树冠内叶片空间中随机分布,叶倾角分布满足球型分布,即 $G(\theta) = 0.5$;(3)忽略树干、枝等非光合组分的消光作用。上述假设被

诸多学者所使用 (Li 和 Strahler, 1988; 徐希孺, 2005)。

2.1 冠层间隙率

在冠层间隙率的推导中, 首先假设树冠为拥有一定几何形状的不透光实体, 则在一定范围的林分区域内放置 n 棵树冠后, 冠层间隙率可以表示为 (Geng 等, 2017; Fan 等, 2014a)

$$P(\theta) = \left(1 - \frac{t_c(\theta)}{S(\theta)}\right)^n \quad (2)$$

式中, $P(\theta)$ 为观测天顶角 θ 下的冠层间隙率; S 为水平面内的林分面积, $S(\theta)$ 为投影到主平面 (垂直于观测方向的平面) 内的林分面积; $t_c(\theta)$ 为树冠在主平面的投影面积, 因此 $t_c(\theta)$ 值受观测天顶角和树冠形状两种因素的影响。

自然条件下, 树冠底层的枝会以一定的倾角向上生长, 因此半椭圆形底部并非完全水平面, 而是在下半部分存在另一个半椭圆, 且受顶端优势的影响, 上半椭圆所占的高度比例会高于下半椭圆, 形成一个如图 1 (b) 所示的两个半椭圆的组合体, 本文称之为双半椭圆形树冠。由于半椭圆形与双半椭圆形的几何实体可以方便的参数化表达, 因此可以通过几何推导出其 $t_c(\theta)$ 值的计算公式。

半椭圆形树冠 $t_c(\theta)$ 计算公式为

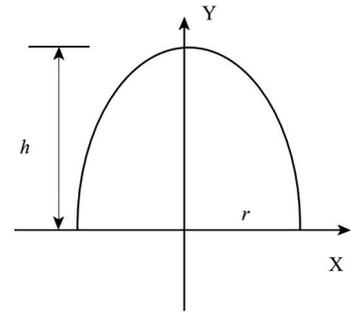
$$t_c(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \pi r \left(\frac{\sqrt{k^2 r^2 + h^2}}{\sqrt{1+k^2}} + r \cos \theta \right), & \theta \neq 0^\circ \\ \pi r^2, & \theta = 0^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中, r 表示树冠半径, h 表示树冠高度, $k = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$ 。

双半椭圆形树冠 $t_c(\theta)$ 计算公式为

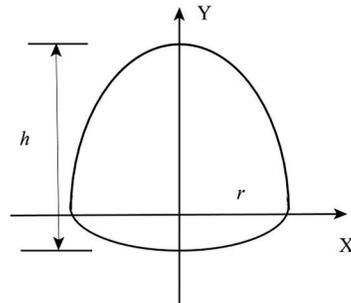
$$t_c(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \pi r \left(\frac{\sqrt{k^2 r^2 + h^2 l_{up}^2} + \sqrt{k^2 r^2 + h^2 l_{blow}^2}}{\sqrt{1+k^2}} + r \cos \theta \right), & \theta \neq 0^\circ \\ \pi r^2, & \theta = 0^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中, l_{up} 与 l_{blow} 表示上下半椭圆所占的高度比例。圆锥形、圆柱形、圆锥+圆柱形树冠的 $t_c(\theta)$ 值推导可参考尹高飞等 (2014)。



(a) 半椭圆形树冠

(a) Semi-ellipsoid-shaped crown



(b) 双半椭圆形树冠

(b) Double semi-ellipsoid-shaped crown

图1 半椭圆形树冠与双半椭圆形树冠纵断面示意图
Fig. 1 Profile diagram of semi-ellipsoid crown and double semi-ellipsoid crown

上述假设是一种极端情况, 以树冠为不透光的几何实体为前提, 可以视为树冠内部充满枝、叶等元素的近似。另一个极端情况即树冠内部枝、叶等元素稀疏, 无法视为几何实体。以上两种极端情况并不常见, 实际则是介于两种情况之间。为进一步考虑到每个树冠内叶片对间隙率的影响, 需要引入单个树冠的间隙率, 即树冠在主平面上的投影并非完全阴影, 而是一个有“透光间隙”的阴影。因此主平面的 $t_c(\theta)$ 需要考虑单个树冠的间隙率。单棵树冠的间隙率可表示为 (Fan 等, 2014a)

$$P_c(\theta) = \exp(-L_0 \cdot \Omega_c \cdot G(\theta) / \gamma_c) \quad (5)$$

式中, $G(\theta)$ 为消光系数, 与叶倾角分布有关, 定义为冠层元素在主平面上的平均投影面积 (Nilson, 1971)。叶倾角分布受多种因素影响, 之前的研究中广泛认为除向日型植物外, 叶片方位角呈对称分布, 叶倾角分布通常可以分为球型、锥型、水平、垂直和椭圆分布等 (Ross, 1981; Campbell, 1986)。 γ_c 为针对枝的面积比例; 本文沿用前人研究, 假设单棵树冠内叶片在空间泊松随机分布 (Li 和 Strahler, 1988; 尹高飞等, 2014;

耿君等, 2016), 因此 $\Omega_c = 1$ 。 L_0 为观测方向的累计叶面积指数:

$$L_0 = \mu \cdot \bar{s} \quad (6)$$

式中,

$$\mu = L/(V \cdot N) \quad (7)$$

$$\bar{s} = V/t_c(\theta) \quad (8)$$

式中, μ 可以表示为叶面积体密度; V 为树冠体积; N 为树冠密度, $N=n/S$; \bar{s} 为光束穿过树冠的平均路径长度 (Chen 和 Leblanc, 1997)。

因此, 式 (2) 可以改写为如下形式 (Geng 等, 2017; Fan 等, 2014a):

$$P(\theta) = \left(1 - t_c(\theta) \cdot \frac{1 - P_c(\theta)}{S(\theta)}\right)^n \quad (9)$$

2.2 聚集度指数

冠层内叶片往往在不同的亚冠层结构 (例如森林中的树冠、树枝和嫩枝、灌木中的叶簇和作物中的行等) 中聚集 (Chen 等, 2005)。这些结构导致叶片的空间分布非随机, 而聚集度指数可以量化叶片分布偏离随机分布的程度 (Nilson, 1971; Chen, 1996)。在相同的 LAI 条件下, 相比于叶片随机分布的冠层, 在一个或多个空间尺度上显示出明显聚集的森林冠层间隙率更高。如果不考虑聚集度指数, 很多光学仪器根据 Lambert-Beer 公式测算的 LAI 通常会被低估。基于光学测量技术和间隙率分析的研究表明, 包含观测角度相关的聚集度指数 $\Omega(\theta)$ 可能会显著改善基于光学仪器的 LAI 测量 (Lang 等, 1986; Chen 等, 1995; Fournier 和 Hall, 2017)。

叶片聚集度指数计算公式为 (Chen 和 Leblanc, 1997)

$$\Omega(\theta) = \frac{\log(P(\theta))}{\log(P_{\text{Poisson}}(\theta))} \quad (10)$$

式中, $\Omega(\theta)$ 描述了当观测天顶角为 θ 时叶片的空间分布偏离泊松分布的程度, 当冠层内叶片呈随机分布时, $\Omega(\theta) = 1$; 当叶片呈聚集分布时, $\Omega(\theta) < 1$; 当叶片呈规则分布时, $\Omega(\theta) > 1$ 。 $P_{\text{Poisson}}(\theta)$ 为叶片在冠层内呈随机分布的冠层间隙率, 可以根据 Lambert-Beer 公式计算得到 (Chen 和 Leblanc, 1997)。

式 (10) 是观测天顶角 θ 的函数; 然而, 在实际测量和建模中发现, $\Omega(\theta)$ 相对误差通常随天顶角的增大而增大。Chen 等 (2005) 将上述 $\Omega(\theta)$ 调整为聚集度指数在半球空间的期望值, 该值不依赖

于具体的观测角度 θ , 且可用于区分光照与阴影叶片, 进而用于冠层叶片光合作用和净初级生产力的估算, 具有重要的意义 (Kucharik 等, 1999; Chen 等, 2012)。其定义为有效叶面积指数 (假设冠层内叶片随机分布由光学仪器观测到的叶面积指数) 与真实叶面积指数的比值 (Chen 等, 2005)。

$$\Omega = L_e/L \quad (11)$$

式中, L_e 定义为有效叶面积指数, 可通过修正后的 Miller 公式 (Miller, 1964) 计算得到。

$$L_e = -2 \int_0^{\pi/2} \ln(P(\theta)) \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (12)$$

为简化计算, 本文对冠层模型进行合理化假设, 其中冠层结构参数参照前人参数设置, 以符合实际为前提 (Li 和 Strahler, 1988; Chen 和 Leblanc, 1997; Fan 等, 2014b)。除特殊说明, 后续分析所需冠层结构参数设置如表 1 所示。

表 1 冠层结构参数

Table 1 Canopy structural parameters

参数	值
林分面积/m ²	100×100
树冠数目	3000
叶面积指数	4
树冠高度/m	2,4,8
树冠半径/m	1
观测天顶角/(°)	0—89
叶倾角分布	球型
Ω_c	1
γ_c	1

2.3 虚拟场景模拟冠层反射率

忽视多次散射的影响, 传感器所探测到的辐射亮度主要由四分量 (光照树冠、光照背景、阴影树冠、阴影背景) 的反射率根据面积加权求和得到 (Li 和 Strahler, 1985)。四分量的面积比例可以根据太阳、传感器和目标物 3 者的几何关系求得, 这也导致森林冠层反射具有二向性, 在实际中通常用二向性反射率因子 BRf (Bi-directional Reflectance Factor) 表述。BRf 的物理意义为: 目标物在给定方向的反射辐射亮度与理想的漫反射体在同方向的反射辐射亮度的比值。BRf 值除了受到太阳辐射入射角度以及传感器观测角度的影响外, 还受到目标物几何特征的影响。因此半球球形树冠与其他形状树冠的冠层间隙率与聚集度指数的差异对于林分场景 BRf 曲线形状有重要影响。本文使用 DART (Discrete Anisotropic Radiative

Transfer) 模型的BRF产品来研究这一影响。

DART模型, 即离散各向异性辐射传输模型, 是一款计算机模拟模型 (Gastellu-Etchegorr 等, 2012), 主要方法是应用光线跟踪法和离散坐标法模拟光子在建模场景中的传输过程, 场景由矩形单元格矩阵构成。DART模型考虑了目标物的各向异性, 且考虑了冠层的几何特征对辐射传输的影响, 因此对于植被的二向性反射模拟效果较好 (Malenovsky 等, 2008; 于颖 等, 2012)。

DART模型中关键参数如表2所示。由于在近红外波段光照树冠比光照背景反射率高, 在模拟中冠层反射率对总体反射率贡献更大, 因此本文分别选择了背景与植被在近红外波段的反射率进行DART模拟 (Li和Strahler, 1992)。

表2 DART模型关键参数

Table 2 Key parameters in DART model

参数	值
单元尺寸/m	0.15×0.15
场景尺寸/m	10×10
树冠数量	30
树冠半径/m	1
树冠高度/m	4
背景反射率	0.1
叶片反射率	0.55
叶片透过率	0.3
叶面积指数	4
叶倾角分布	球型
太阳天顶角/(°)	30
太阳方位角/(°)	0
观测天顶角/(°)	0—80
天顶角间隔/(°)	10

3 结果分析与讨论

在前文提到的假设与事实的基础上, 本文实现半椭圆形树冠与其他形状树冠的冠层间隙率、聚集度指数以及半球空间聚集度指数期望值的对比, 从而研究树冠形状对冠层间隙率与聚集度指数的影响。

3.1 不同树冠高度下, 半椭圆形树冠与其他树冠形状的冠层间隙率对比

保持其他参数不变, 图2 (a)、(b) 和 (c) 中所示分别为 2 m、4 m 和 8 m 共 3 种树冠高度下, 5 种不同树冠形状的冠层间隙率对比。可以得出, 当观测天顶角 $\theta=0^\circ$ 时, 3 种高度下 5 种树冠形状冠层间隙率值均相等, 这是因为树冠半径设置相同, 此时树冠在主平面的投影不受到树冠形状、高度等几何特征的影响, 即天底下观测到的所有冠层结构参数一致, 因此具有相同的冠层间隙率。而当发生斜视时, 可以观测到不同树冠形状的几何特征, 冠层间隙率也产生变化。

随着观测天顶角增大, 3 种高度下, 5 种树冠形状冠层间隙率都呈现不同程度的递减趋势, 直到交于 0。从观测方向看, 观测天顶角为 0° 的天底方向树冠的重叠最小, 此时冠层间隙率最大。随着观测天顶角的增大, 观测方向树冠重叠逐渐增大, 因此, 冠层间隙率呈降低趋势。其中, 相同观测天顶角下, 圆柱形树冠间隙率最小, 圆锥形间隙率最大。这种情况可结合冠层间隙率公式分析: 冠层间隙率与单个树冠在主平面的投影面积 $t_c(\theta)$ 呈反比, 在相同观测天顶角下, 圆柱形树冠 $t_c(\theta)$ 值最大, 圆锥形树冠最小, 半椭圆形、圆锥+圆柱形和双半椭圆形树冠介于两者之间。

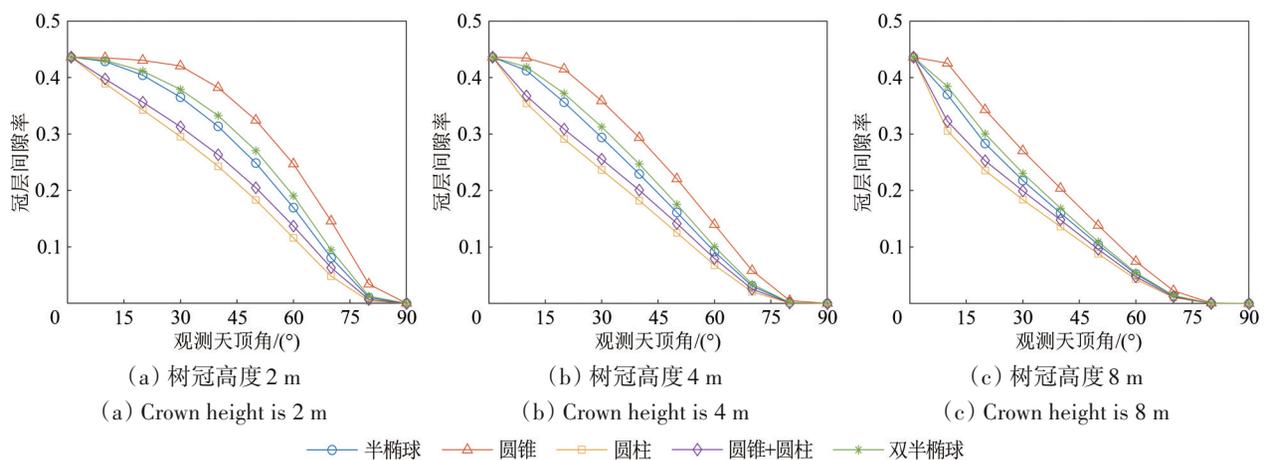


图2 不同树冠高度, 不同树冠形状冠层间隙率对比

Fig. 2 Comparison of gap fraction of canopies with different crown shapes and different crown height

为了更直观地反映当分别选择其他4种树冠形状计算冠层间隙率的结果与实际半椭球形树冠冠层间隙率的差距,本文引入相对差异来定量描述这一差距。相对差异计算方法为 $(b-a)/a$, a 表示半椭球形树冠的冠层间隙率, b 表示其他形状树冠的冠层间隙率。图3所示为3种树冠高度下,4种形状的树冠与半椭球形树冠的冠层间隙率相对差异。从图3中可以得出,4种形状的树冠与半椭球形树冠的冠层间隙率相对差异随观测天顶角变化而变化。其中双半椭球形与半椭球形相对差异最小,相对差异随观测天顶角增加,树冠高度为4 m和

8 m时,相对差异维持在10%以内,而树冠高度2 m时,最大可达38%。圆柱形与圆锥+圆柱形与半椭球形相对差异在观测天顶角 0° — 15° 逐渐增加, 15° — 65° 维持稳定,分别在20%与14%左右;观测天顶角 65° 以上时急剧增加,在 90° 时达到100%。而圆锥形与半椭球形有较大的相对差异,以及较快的误差增长趋势,在观测天顶角 65° 时已达到100%。虽然在实际多角度观测中不易达到特别大的观测天顶角,但在其他较低角度下,上述不同形状与半椭球的相对差异依旧不容忽视。

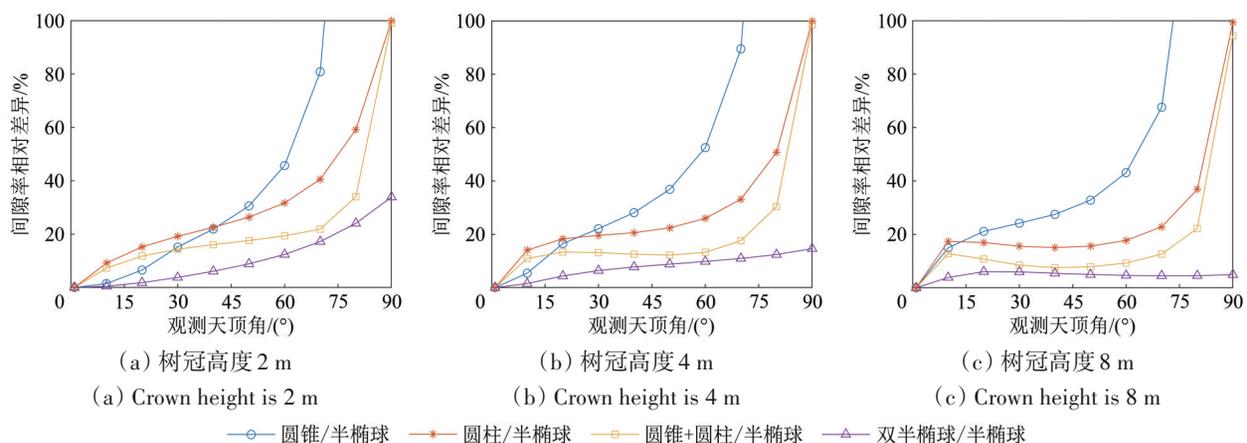


图3 不同树冠高度、不同树冠形状冠层间隙率相对差异

Fig. 3 Relative differences of gap fraction of canopies with different crown shapes and different crown height

树冠高度属于尺寸特征,耿君等(2016)的研究表明树冠尺寸特征对冠层间隙率和聚集度指数有显著影响。通过横向对比3(a)、(b)和(c)可以发现:相同观测天顶角与树冠形状,随着树冠高度的增加,冠层间隙率降低;随树冠高度增加,同一观测天顶角下,圆柱形与圆锥+圆柱形树冠与半椭球形树冠冠层间隙率相对差异逐渐降低,而树冠高度越高,圆锥形树冠与半椭球形树冠冠层间隙率相对差异变小。

3.2 不同树冠高度下,半椭球形树冠与其他树冠形状的聚集度指数对比

图4(a)、(b)与(c)所示为树冠高度分别为2 m、4 m和8 m时,5种树冠形状的聚集度指数变化曲线。首先,在给定LAI条件下,叶片的聚集效应并不会改变一定空间内叶片的总面积,它与叶片的空间分布有关。可以理解为:在林分范围内具有相同的叶面积指数,叶片的聚集效应越高,该林分场景间隙率越高。因此可以预测聚集度指

数与冠层间隙率变化趋势相反,随观测天顶角增大呈递增趋势。其次,根据式(10)也可以得出:由于公式中对冠层间隙率的值取对数,且对应冠层间隙率小于1,故聚集度指数与冠层间隙率呈反比,因此5种冠形的聚集度指数大小关系与间隙率相反。3幅图中曲线变化符合上述分析的规律:3种树冠高度下,圆柱形树冠聚集度指数最高,圆锥形树冠聚集度指数最低,半椭球形树冠介于两者之间;相同观测天顶角下,随树冠高度的降低,五种树冠形状的聚集度指数降低,说明叶片越聚集。

不同树冠高度下,半椭球形树冠与其他树冠形状的聚集度指数差异也不同。图5(a)、(b)与(c)反映了3种树冠高度下误判树冠形状所计算的聚集度指数与半椭球形树冠的相对差异。从3幅图中可得:3种树冠高度下,随观测天顶角增加,圆柱形与圆锥+圆柱形树冠聚集度指数呈先升高后降低趋势,例如当树冠高度为4 m时,两种树冠形状与半椭球形树冠聚集度指数相对差异在观测天顶

角20°左右达到最大值,分别为20%与15%;双半椭圆形树冠与半椭圆形树冠聚集度指数相对差异较低,3种树冠高度下最大不超过8%。圆锥形树冠与半椭圆形树冠的聚集度指数差异变化与其余

几种树冠形状的差异有所不同。树冠高度2 m时,随观测天顶角增加相对差异持续增大,最大可达30%左右,而树冠高度为4 m与8 m条件下,相对差异呈先增大后趋于稳定趋势。

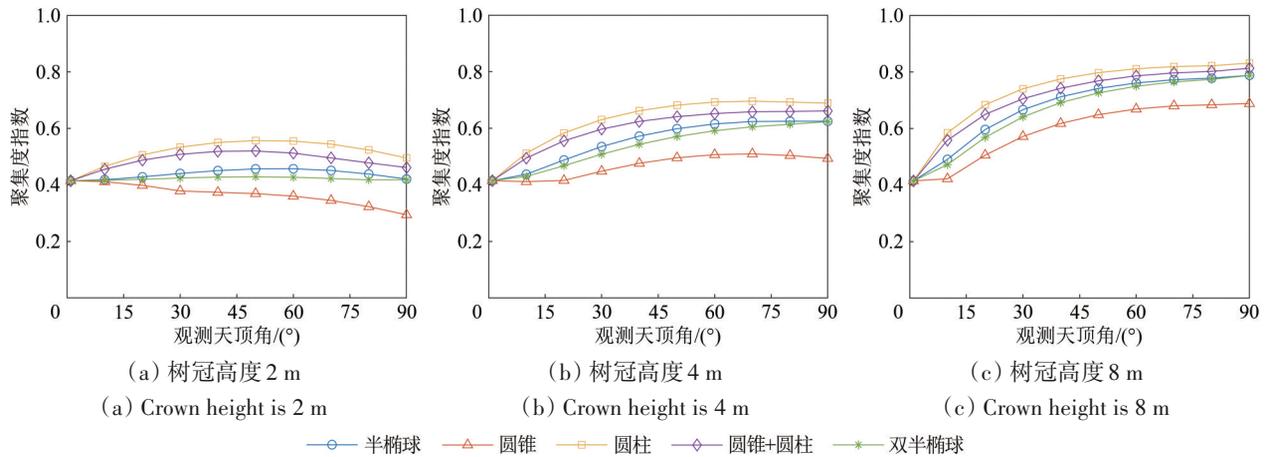


图4 不同树冠高度、不同树冠形状聚集度指数对比

Fig. 4 Comparison of clumping index with different crown shapes and different crown height

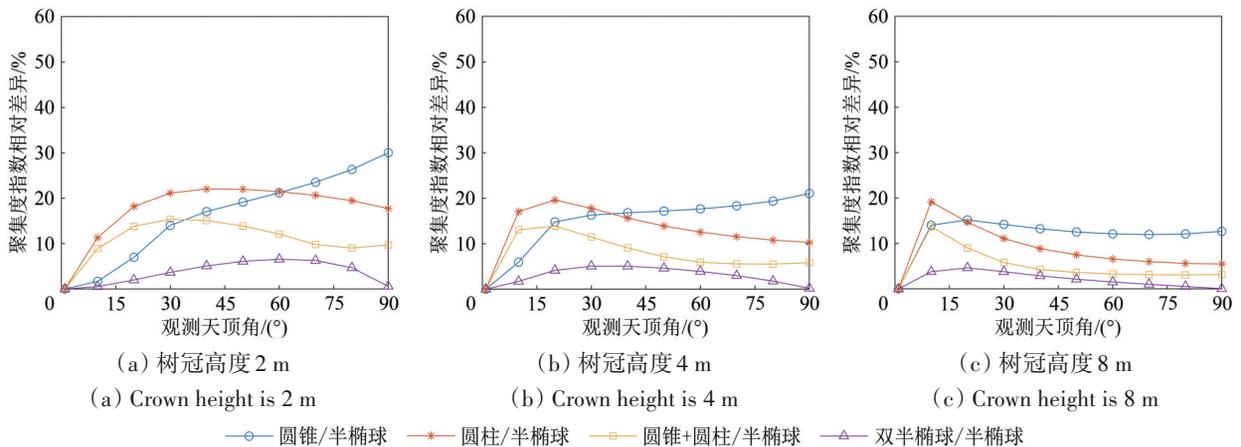


图5 不同树冠高度、不同树冠形状聚集度指数相对差异

Fig. 5 Relative differences of clumping index with different crown shapes and different crown height

总之,本文通过改变树冠高度对半椭圆形树冠与其他形状树冠的冠层间隙率与聚集度指数进行对比分析。分析结果表明,在多种情况下,半椭圆形树冠与其他树冠形状冠层间隙率与聚集度指数误差不容忽视。误差来源是树冠的几何形状等冠层结构参数不同,随着观测天顶角变化会观测到树冠不同几何特征,导致最终计算结果出现误差。随着多角度遥感在植被结构参数反演的应用,遥感传感器会观测到更多的信息,尤其是树冠的几何信息,因此需要对目标树冠在空间的三维结构特征进行准确地描述,以提高反演结果的精度。

3.3 半椭圆形树冠半球空间聚集度指数期望值与其他树冠形状对比

因为本文假设树冠内部叶片满足泊松随机分布,因此聚集度指数在半球空间的期望值 Ω 考虑在树冠尺度,主要受树冠几何形状的影响。图6所示为5种树冠形状冠层半球空间聚集度指数期望值,其中树冠高度固定为4 m。可见,半球空间聚集度指数期望值圆锥形树冠最低,圆柱形树冠最高。圆柱形树冠比半椭圆形树冠值高约13%,半椭圆形树冠值比圆锥形树冠值高约22%,半椭圆形树冠与圆锥形、圆柱形树冠的差异不容忽视。在实际应用中需要对半椭圆形树冠足够重视,若

将上述树冠形状设置错误, 会对最终结果产生较大影响; 半椭球形与双半椭球形树冠较为接近, 混用树冠形状对结果影响不大。

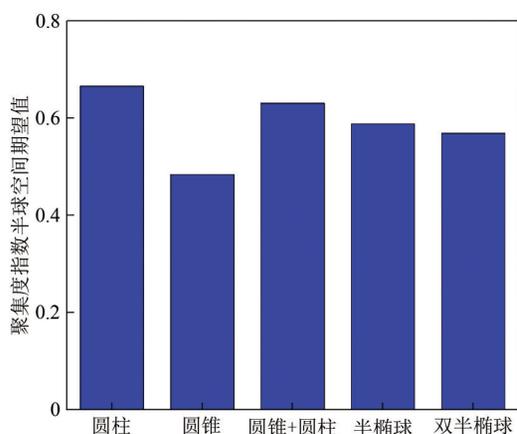


图6 5种树冠形状半球空间聚集度指数期望值对比
Fig. 6 Comparison of expectation of clumping index in hemisphere space of five crown shapes

3.4 半椭球形树冠与其他树冠形状的BRF对比

利用DART模型对半椭球形、圆锥形、圆柱形和圆锥+圆柱形4种树冠形状进行模拟, 4种模拟

场景中, 除树冠形状不同, 其余参数保持一致模型参数设置如表2所示。图7所示为4种树冠形状冠层的DART三维模型, 在模型中需要输入树冠坐标位置文件, 树冠在场景中随机分布, 因此由随机数产生在场景范围内的30棵树的坐标位置。

图8所示为4种树冠形状的BRF曲线模拟结果, DART模型模拟BRF结果为半球空间, 此处选择观测视线与太阳光线在同一平面(即观测方位角为 0° 与 180°)的16个观测天顶角绘制BRF曲线。图中 0° 左侧表示后向散射方向, 右侧为前向散射方向。从图中可以得出, 后向散射方向BRF值高于前向散射方向BRF值; 3种树冠形状的BRF曲线具有相同的形状, 在观测天顶角等于本文所设置的太阳天顶角 30° 时, 出现热点现象; 圆柱形树冠BRF值最高, 圆锥形树冠BRF值最低。这与冠层间隙率有关: 在相同的观测天顶角下, 圆柱形树冠冠层间隙率最低, 说明传感器可以观测到更多的叶片, 更少的背景, 根据模型参数设置, 叶片反射率高于背景土壤反射率, 因此具有更高的BRF值。3种树冠形状的BRF曲线有较明显差异, 具体差异通过相对差异图进一步说明。

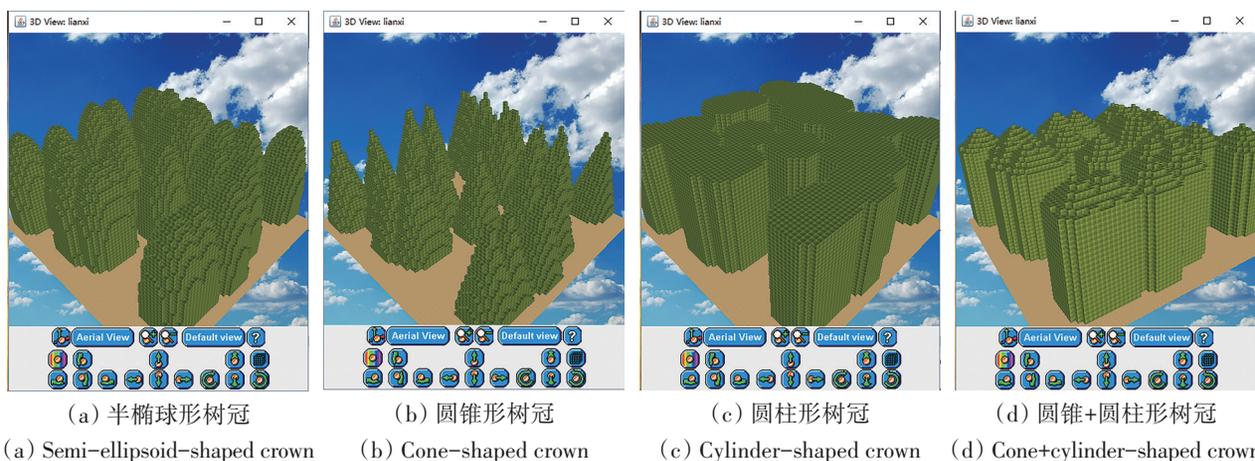


图7 4种树冠形状DART建模
Fig. 7 DART model of four crown shapes

对比图3(b)与图9可以得出: 相较于不同树冠形状下冠层间隙率与聚集度指数的相对差异, 半椭球形树冠与圆锥、圆柱形以及圆锥+圆柱形的BRF值相对差异偏低, 这是因为传感器探测到的总辐射包括背景与冠层的反射辐射, 树冠形状差异对BRF的影响受到背景的稀释。同时, 如图2中所示, 冠层间隙率随观测天顶角增加而降低, 说明观测天顶角越小, 暴露出来的背景所占比例越

大, 背景反射所造成的稀释程度越大, 因此, 如图中所示随观测天顶角增大, 圆锥形、圆柱形与圆锥+圆柱形树冠与半椭球形树冠冠层BRF值相对差异逐渐增大。值得注意的是, 前向散射方向3种树冠形状与半椭球形的相对差异高于后向散射方向。在前向散射方向, 观测天顶角 0° — 13° 时圆锥形、圆柱形、圆锥+圆柱形与半椭球形树冠BRF值相对差异迅速增加, 在 13° 时达到最大, 分别为

19%、24%与15%，此后保持相对稳定；在后向散射方向，相对差异在观测天顶角80°时达到最大，分别在11%、12%与5%左右。

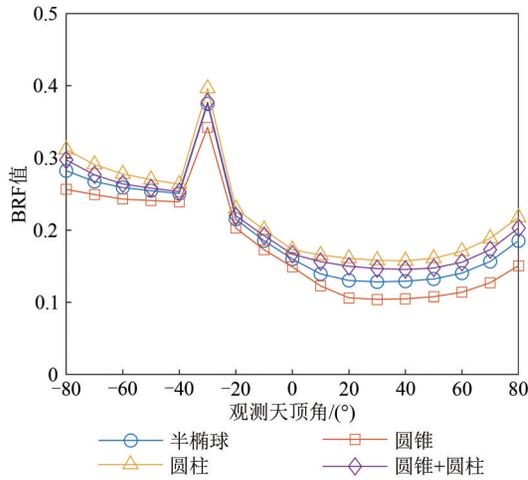


图8 4种树冠形状BRF值对比

Fig. 8 Comparison of BRF values of four crown shapes

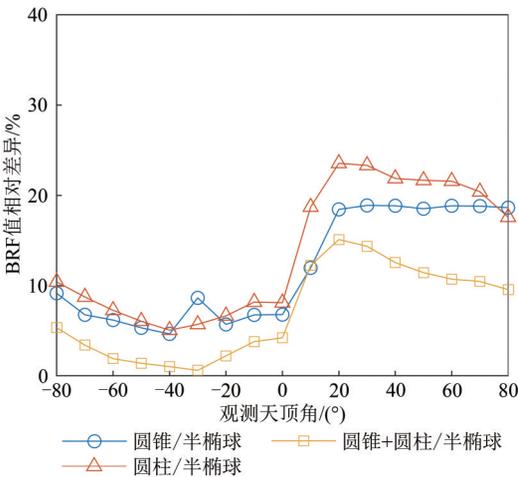


图9 不同树冠形状的冠层BRF值相对差异

Fig. 9 Relative differences of BRF values with different crown shapes

3.5 树冠密度

受外界环境以及树种等因素影响，森林冠层的树冠密度存在差异。在其他条件不变的情况下，树冠密度影响着林分内叶总面积。同时，在不同观测天顶角下，树冠的疏密也影响着树冠与树冠间的互相遮挡程度。因此，对于不连续植被，除树冠形状以及树冠高度等参数外，树冠密度同样对冠层间隙率与聚集度指数有重要影响。此处讨论树冠密度对冠层间隙率的影响，因此沿用表1中的基本参数设置，且树冠高度固定为4 m，将树冠数目设置为1000和2000，即对应树冠密度分别为0.1和0.2。

图10与图11所示为两种树冠密度情况下，不同树冠形状聚集度指数及其相对差异曲线。前文图4(b)和图5(b)中树冠密度为0.3，与此处参数设置的唯一变量为树冠密度，因此可进行对比分析。对比图10(a)和(b)以及图4(b)可以发现，随着树冠密度增大，同一树冠形状聚集度指数增大，说明树冠密度越大，叶片分布越趋向于泊松分布。在一定范围的树冠密度下，由于叶片假设为在树冠内部泊松随机分布，树冠越密集，叶片的随机效应越明显，而树冠越稀疏，叶片在树冠尺度的聚集效应越显著；4种树冠相对于半椭圆形树冠的相对差异变化规律与前文分析类似，且随树冠密度的降低，半椭圆形树冠与其他树冠形状的聚集度指数相对差异呈增大趋势。

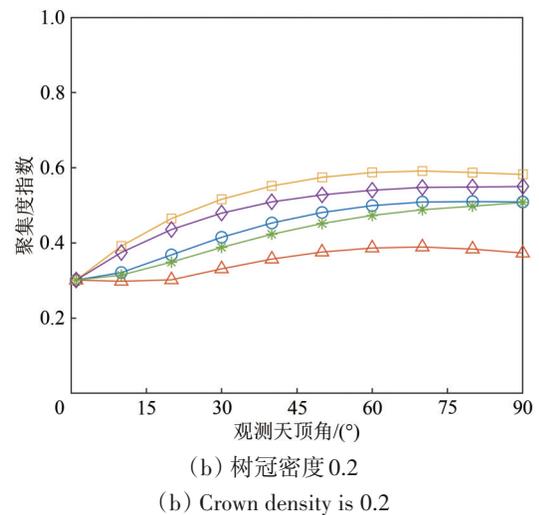
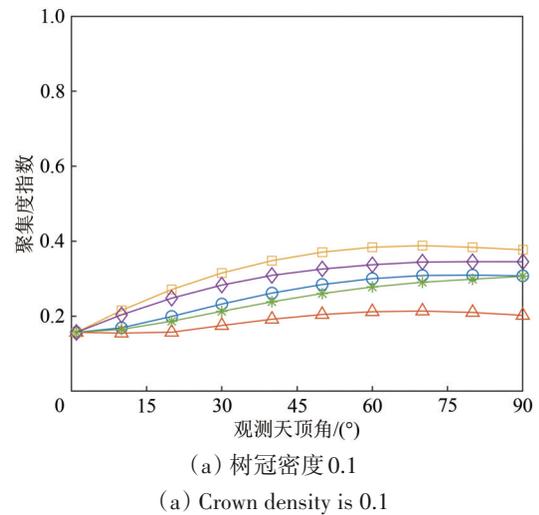


图10 不同树冠密度、不同树冠形状聚集度指数对比
Fig. 10 Comparison of clumping index with different crown density and different crown shapes

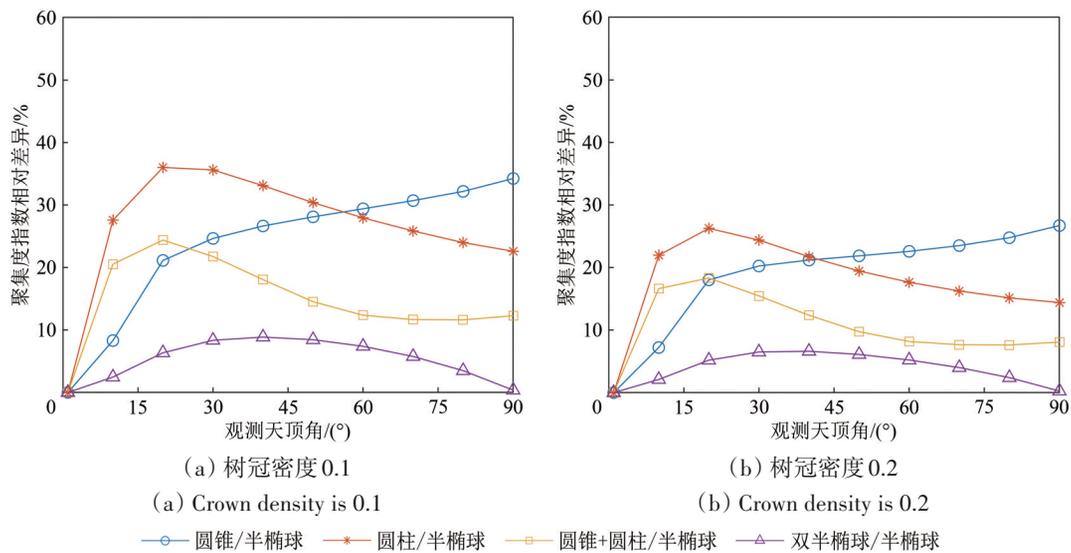


图 11 不同树冠密度、不同树冠形状聚集度指数相对差异

Fig. 11 Relative differences of clumping index with different crown shapes and different crown density

尽管在本文的模拟分析中，为简化计算做了假设，但这些假设尽可能以符合实际情况为前提，因此计算结果具有一定的可信性与代表性。由于现实自然环境的复杂性以及不确定性，本文以理论研究为主，下一步将继续完善细节以结合实测数据来检验树冠形状的影响。

4 结论

树冠形状是冠层结构特征的重要组成部分，与森林冠层拦截光辐射的能力有密切关系，因此在冠层结构的研究中需要对其进行准确的描述。众多学者应用多种树冠形状（圆锥形、圆柱形、圆锥+圆柱形等）计算了冠层间隙率与聚集度指数等树冠结构参数。然而，上述树冠形状通常过于理想化。受外界环境以及树冠顶端优势等的影响，相较于上述树冠形状，半椭圆形能更好地反映树冠自然生长规律。半椭圆形树冠作为一种常见的树冠形状，与其他树冠形状有着明显差异，对冠层间隙率与聚集度指数的计算有重要影响。本文在树冠呈现泊松随机分布假设的前提下，推导了半椭圆形树冠的冠层间隙率与聚集度指数计算公式，并进一步扩展到双半椭圆形树冠。同时将以上两种树冠形状与其他3种理想树冠形状（圆锥形、圆柱形、圆锥+圆柱形）的冠层间隙率、聚集度指数和半球空间聚集度指数期望值进行对比。主要研究结论如下：

(1) 半椭圆形树冠与其他树冠形状的冠层间

隙率有较大差异。4种形状树冠与半椭圆形树冠的冠层间隙率相对差异随观测天顶角变化而变化。当观测天顶角为70°时，圆锥形树冠与半椭圆形树冠的冠层间隙率相对差异已接近100%。改变树冠高度，半椭圆形树冠与其他形状树冠冠层间隙率的差异依旧不容忽视。

(2) 树冠形状对聚集度指数同样有较明显影响。随观测天顶角增大，圆柱形与圆锥+圆柱形树冠与半椭圆形树冠聚集度指数相对差异先增加后降低，当树冠高度为4 m时，两种树冠形状与半椭圆形树冠聚集度指数相对差异在观测天顶角20°左右达到最大值，分别为20%与15%；极端情况下，圆锥形树冠与半椭圆形树冠聚集度指数相对差异达到30%。除此之外，不同树冠密度对几种树冠形状的聚集度指数同样有重要影响，随树冠密度的降低，半椭圆形树冠与其他树冠形状的聚集度指数相对差异呈增大趋势。

(3) 在半球空间聚集度指数期望值的计算中，圆柱形树冠比半椭圆形树冠值高约13%，半椭圆形树冠值比圆锥形树冠值高约22%在实际应用中需要对半椭圆形树冠予以重视；双半椭圆形与半椭圆形树冠值较为接近。

参考文献 (References)

- Asner G P, Palace M, Keller M, Pereira R Jr, Silva J N M and Zweede J C. 2002. Estimating canopy structure in an Amazon forest from laser range finder and IKONOS satellite observations. *Biotropica*,

- 34(4): 483-492 [DOI: 10.1111/j.1744-7429.2002.tb00568.x]
- Baldwin V C Jr and Peterson K D. 1997. Predicting the crown shape of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(1): 102-107 [DOI: 10.1139/x96-100]
- Biging G S and Wensel L C. 1990. Estimation of crown form for six conifer species of northern California. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(8): 1137-1142 [DOI: 10.1139/x90-151]
- Borchert R and Slade N A. 1981. Bifurcation ratios and the adaptive geometry of trees. *Botanical Gazette*, 142(3): 394-401 [DOI: 10.1086/337238]
- Campbell G S. 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36(4): 317-321 [DOI: 10.1016/0168-1923(86)90010-9]
- Chen J M. 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80(2/4): 135-163 [DOI: 10.1016/0168-1923(95)02291-0]
- Chen J M and Black T A. 1992a. Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 60(3/4): 249-266 [DOI: 10.1016/0168-1923(92)90040-B]
- Chen J M and Black T A. 1992b. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*, 15(4): 421-429 [DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x]
- Chen J M and Cihlar J. 1995. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index. *Applied Optics*, 34(27): 6211-6222 [DOI: 10.1364/AO.34.006211].
- Chen J M and Leblanc S G. 1997. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5): 1316-1337 [DOI: 10.1109/36.628798]
- Chen J M, Menges C H and Leblanc S G. 2005. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 97(4): 447-457 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.003]
- Chen J M, Mo G, Pisek J, Liu J, Deng F, Ishizawa M and Chan D. 2012. Effects of foliage clumping on the estimation of global terrestrial gross primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1): (GB1019 [DOI: 10.1029/2010GB003996])
- Deleuze C, Hervé J C, Colin F and Ribeyrolles L. 1996. Modelling crown shape of *Piceaabies*: spacing effects. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(11): 1957-1966 [DOI: 10.1139/x26-221]
- Ellsworth D S and Reich P B. 1993. Canopy structure and vertical patterns of photosynthesis and related leaf traits in a deciduous forest. *Oecologia*, 96(2): 169-178 [DOI: 10.1007/bf00317729]
- Fan W L, Chen J M, Ju W M and Nesbitt N. 2014a. Hybrid geometric optical-radiative transfer model suitable for forests on slopes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9): 5579-5586 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2290590]
- Fan W L, Chen J M, Ju W M and Zhu G L. 2014b. GOST: a geometric-optical model for sloping terrains. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9): 5469-5482 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2289852]
- Fournier A R and Hall R J. 2017. *Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications*. Dordrecht, The Netherlands: Springer: 153-177
- Gastellu-Etchegorry J P, Grau E and Lauret N. 2012. DART: a 3D model for remote sensing images and radiative budget of earth surfaces//Alexandru C. *Modeling and Simulation in Engineering*. Rijeka: InTech. [DOI: 10.5772/31315]
- Geng J, Chen J M, Fan W L, Tu L L, Tian Q J, Yang R R, Yang Y J, Wang L, Lv C G, and Wu S B. 2017. GOFP: a geometric-optical model for forest plantations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9): 5230-5241 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2704079]
- Geng J, Tian Q J, Tu L L, Fan W L and Wang X F. 2016. Influences of crown size on the estimation of gap fraction and clumping index. *Journal of Remote Sensing*, 20(6): 1319-1327 (耿君, 田庆久, 涂丽丽, 范渭亮, 王晓菲. 2016. 树冠尺寸对冠层间隙率和聚集度指数的影响. *遥感学报*, 20(6): 1319-1327) [DOI: 10.11834/jrs.201666060]
- Hashimoto R. 1991. Canopy development in young sugi (*Cryptomeria japonica*) stands in relation to changes with age in crown morphology and structure. *Tree Physiology*, 8(2): 129-143 [DOI: 10.1093/treephys/8.2.129]
- Huang H G, Zhang Z Y, Ni W J, Chai L N, Qin W H, Liu G, Xie D H, Jiang L M and Liu Q H. 2018. Extending RAPID model to simulate forest microwave backscattering. *Remote Sensing of Environment*, 217: 272-291 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.011]
- Jiang Z L and Ye J Z. 1980. A preliminary study on the crown structure of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 23(4): 46-52 (姜志林, 叶镜中. 1980. 杉木树冠形态结构的初步研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 23(4): 46-52) [DOI: 10.3969/j.jssn.1000-2006.1980.04.006]
- Kohyama T. 1980. Growth pattern of *Abies mariesii* saplings under conditions of open-growth and suppression. *The Botanical Magazine=Shokubutsu-Gaku-Zasshi*, 93(1): 13-24 [DOI: 10.1007/BF02489483]
- Kucharik C J, Norman J M and Gower S T. 1999. Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach. *Tree Physiology*, 19(11): 695-706 [DOI: 10.1093/treephys/19.11.695]
- Lang A R G and Xiang Y Q. 1986. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 37(3): 229-243 [DOI: 10.1016/0168-1923(86)90033-X]
- Lefsky M A, Cohen W B, Acker S A, Parker G G, Spies T A and Harding D. 1999. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70(3): 339-361 [DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00052-8]
- Li D Z and Zang R G. 2004. The research advances on the structure

- and function of forest canopy, as well as their temporal and spatial changes. *World Forestry Research*, 17(3): 12-16 (李德志, 臧润国. 2004. 森林冠层结构与功能及其时空变化研究进展. *世界林业研究*, 17(3): 12-16 [DOI: 10.3969/j.issn.1001-4241.2004.03.003])
- Li F R. 2004. Modeling crown profile of *Larix olgensis* trees. *Scientia Silvae Sinicae*, 40(5): 16-24 [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2004.05.003]
- Li X W and Strahler A H. 1985. Geometric-Optical modeling of a Conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5): 705-721 [DOI: 10.1109/TGRS.1985.289389]
- Li X W and Strahler A H. 1988. Modeling the gap probability of a discontinuous vegetation canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(2): 161-170 [DOI: 10.1109/36.3017]
- Li X W and Strahler A H. 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 276-292 [DOI: 10.1109/36.134078]
- Malenovsky Z, Martin E, Homolová L, Gastellu-Etchegorry J P, Zurita-Milla R, Schaepman M E, Pokorný R, Clevers J G P W and Cudlín P. 2008. Influence of woody elements of a Norway spruce canopy on nadir reflectance simulated by the DART model at very high spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 1-18 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.028]
- Miller J B. 1964. An integral equation from phytology. *Journal of the Australian Mathematical Society*, 4(4): 397-402 [DOI: 10.1017/S1446788700025210]
- Nilson T. 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural Meteorology*, 8: 25-38 [DOI: 10.1016/0002-1571(71)90092-6]
- Parker G G, Lowman M D and Nadkarni N M. 1995. Structure and microclimate of forest canopies//Lowman M D and Nadkarni N M, eds. *Forest Canopies*. New York: Academic Press: 73-106
- Power H, Lemay V, Berninger F, Sattler D and Kneeshaw D. 2012. Differences in crown characteristics between black (*Picea mariana*) and white spruce (*Picea glauca*). *Canadian Journal of Forest Research*, 42(9): 1733-1743 [DOI: 10.1139/x2012-106]
- Purves D W, Lichstein J W and Pacala S W. 2007. Crown plasticity and competition for canopy space: a new spatially implicit model parameterized for 250 north American tree species. *PLoS One*, 2(9): e870 [DOI: 10.1371/journal.pone.0000870]
- Ross J. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Netherlands: Springer: 90-116
- Xu C Y. 2001. Response of structural plasticity of *Tilia amurensis* sapling crowns to different light conditions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12(3): 339-343 (徐程扬. 2001. 不同光环境下紫椴幼树树冠结构的可塑性响应. *应用生态学报*, 12(3): 339-343) [DOI: 10.1007/s11769-001-0027-z]
- Xu X R. 2005. *Remote Sensing Physics*. Beijing: Peking University Press: 44-94 (徐希孺. 2005. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社: 44-94)
- Yin G F, Liu Q H, Li J, Zeng Y L and Xu B D. 2014. Effect of crown shape on the estimation of gap probability and leaf area index. *Journal of Remote Sensing*, 18(4): 752-759 (尹高飞, 柳钦火, 李静, 曾也鲁, 徐保东. 2014. 树冠形状对孔隙率及叶面积指数估算的影响分析. *遥感学报*, 18(4): 752-759) [DOI: 10.11834/jrs.20143205]
- Yu Y, Fan W Y and Yang X G. 2012. Comparisons of three models for vegetation canopy bi-directional reflectance distribution function. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36(1): 55-62 (于颖, 范文义, 杨曦光. 2012. 三种植被冠层二向反射分布函数模型比较. *植物生态学报*, 36(1): 55-62) [DOI: 10.3724/SP.J.1258.2012.00055]

Influences of semiellipsoid-shaped crown on gap fraction and clumping index

WANG Shaoteng^{1,2}, GENG Jun^{1,2}, TU Lili³, YIN Gaofei⁴

1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Intelligent Interconnected Systems Laboratory of Anhui Province (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China;

3. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

4. Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: The structural characteristics of forest canopy directly affect the radiation interception of forest, which in turn affect the energy exchange between the canopy and the external environment. As an important part of forest canopy structure, crown shape is greatly important for calculating the gap fraction and clumping index. Researchers have calculated gap fraction and clumping index by simulating crown shape as basic geometry, such as cone, cylinder, and cone + cylinder. However, the growth of the crown is influenced by factors, such as external environment and internal apical dominance, resulting in the semiellipsoid shape of the crown. The semiellipsoid is more consistent with the natural growth low of the crowns than these crown shapes. In fact, the semiellipsoid is a very common crown shape, which is significantly different from other crown shapes with an important influence on the calculation of canopy structure parameters, such

as the gap fraction of canopies and clumping index. The main objective is to exhibit the influence of the semiellipsoid-shaped crown on the gap fraction and clumping index of forest canopies.

First, assuming that the crown is an opaque geometric entity with the Poisson distribution in space, the gap fraction on crown scale was calculated. Second, considering that gaps exist in an individual crown, the formula for calculating the gap fraction of an individual crown was introduced. Then, crowns with semiellipsoid and double semiellipsoid shapes were applied to the formula of gap fraction of canopies and clumping index. Meanwhile, considering the semiellipsoid-shaped crown as the calculation criterion, we analyzed the relative differences of gap fraction of canopies and clumping index with different crown shapes. The main input parameters included crown density, crown height, crown radius and leaf area index. Finally, the results were verified by virtual scenes.

The results indicated that: (1) the gap fraction of canopies between the semiellipsoid-shaped crown and crowns with other shapes was relatively different. With the increment of view zenith angle, the relative differences of gap fraction between the semiellipsoid-shaped crown and crowns with other shapes increased. When the view zenith angle was 70° , the relative difference of gap fraction between the cone-shaped crown and the semiellipsoid-shaped crown was close to 100%. (2) The crown shape also had a significant influence on the clumping index. In extreme cases, the relative differences of clumping index between the cone-shaped crown and the semiellipsoid-shaped crown reached up to 30%. In addition, different crown densities had an important effect on the clumping index of different crown shapes. With the decrease in crown density, the relative difference in the clumping index of the semiellipsoid-shaped crown and crowns with other shapes showed an increasing trend. (3) When calculating the expectation value of the clumping index in the hemisphere space, the value of the cylinder-shaped crown was approximately 13% higher than the value of the semiellipsoid-shaped crown, and the value of the semiellipsoid-shaped crown was approximately 22% higher than that of cone-shaped crown. The value of the semiellipsoid-shaped crown and double semiellipsoid-shaped crown was close to each other, and the mixture of two crown shapes slightly influenced the results.

Therefore, the semiellipsoid-shaped crown should be considered when studying the structural characteristics of forest canopy, such as gap fraction and clumping index.

Key words: remote sensing, crown shape, semi-ellipsoid-shaped crown, double semi-ellipsoid-shaped crown, gap fraction, clumping index

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41701383, 41801234); Anhui Provincial Natural Science Foundation (No. 1808085QD105)