

坡面单木圆锥形树冠投影边界的模型理论

张 蕾, 于海业*, 杨昊谕, 张志平

(吉林大学生物与农业工程学院, 地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 遮荫作为树冠对辐射截留的集中表现, 与林下环境, 特别是光环境特征具有密切关系。为满足坡地人工林下作物、中药栽培环境模拟、预测和控制的理论需要, 以圆锥形树冠为研究对象, 借助几何光学中光的直线传播原理, 根据水平投影与坡面投影的亲似对应关系, 在坡平面直角坐标系内讨论树冠的坡面投影形状、确定投影关键点坐标, 在测树因子、经纬度、坡度、坡向、时间(包括时刻和日期)等变化要素基础上建立坡面投影理论边界模型 $Z(x', y) = 0$ 。经模拟验证, 各时刻实测与计算阴影边界曲线相关系数大于等于 0.928、显著水平 (P) 均达到 0.01, 表明该模型可较精确地描述正圆锥的坡面投影。在此基础上, 进行模型的实用检验和分析, 选择北半球中纬度单株樟子松, 计算得到 5 月 12 日 8:00~14:00 树木遮荫影响最远到达东 0.69 倍树高、西 1.18 倍树高、南 0.2 倍树高、北 0.4 倍树高, 绝大多数阴影位于近似扇环的区域内, 计算结果符合北半球太阳视运动规律且实际观测结果与计算值之间相关系数为 0.983 ($P = 0.008$), 证明该模型适用于树冠的遮荫分析, 并可能在邻体遮光干扰的进一步研究中发挥作用。最后讨论该模型的优点及局限性, 明确模型在实际研究中合理运用的条件。

关键词: 坡面; 圆锥形树冠; 亲似对应; 投影边界; 模型

文章编号: 1000-0933(2006)10-3317-07 **中图分类号:** O185, Q141, Q948.1, S181 **文献标识码:** A

Theoretical research on a model for predicting the shadow boundary of an individual conical crown on a slope

ZHANG Lei, YU Hai-Ye*, YANG Hao-Yu, ZHANG Zhi-Ping (Key Laboratory for Terrain-Machine Bionics Engineering of MOE, School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3317~3323.

Abstract: Tree-shading could represent solar radiation intercepted by the tree crown. Understory light environment also had a close relation with tree-shading. The conical crown was studied because it was familiar and its shadow, whether on a flat plane or slope, was more complex than other crown profiles. The shadow profile of an individual conical crown on a slope was an ellipse or a closed curve composed of an ellipse and its two tangents, which depended on the relationship between the solar altitude (h_s) and the base angle (A) of the cone. In the rectangular plane coordinate system, a theoretical model was developed, which took tree height (H), height below branch (h), crown radius (r), longitude (λ), latitude (ϕ), height (ht), slope (α), aspect (β), date (d) and time (t) into account to describe the shadow boundary of an individual conical crown on the slope. The model was based on geometrical optics theory and the corresponding and imitating principle between shadows on a flat plane and a slope. In the simulation test, the results of Spearman and Kendall's tau-b test showed all correlations between measured and calculated values of boundaries were not less than 0.928 and were significant at the 0.01 level (2-tailed) from 8:00 to 14:00. The model, therefore, was suitable to describe the shadow boundary of an individual cone, and the more the actual profile of the crown resembled a cone, the more accurate the simulated results. Furthermore, this model was practically used to forecast the variable scale of tree-shading of an individual tree species, *Pinus sylvestris*, in which the shadow of the crown always lied, from 8:00 to

基金项目: 吉林省科技厅重点资助项目 (20040207-1)

收稿日期: 2006-01-11; **修订日期:** 2006-07-29

作者简介: 张蕾 (1979~), 女, 吉林人, 博士生, 主要从事农业生物环境研究. E-mail: zhanglei.0902@sina.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haiye@jlu.edu.cn

Foundation item: The project was supported by Emphases projects of Department of Science & Technology of Jilin Province (No. 20040207-1)

Received date: 2006-01-11; **Accepted date:** 2006-07-29

Biography: ZHANG Lei, Ph. D., mainly engaged in agriculture biological environment. E-mail: zhanglei.0902@sina.com

14:00 on May 12th. Theoretically, this scale reached 0.69H on the east side of the tree, 1.18H on the west, 0.2H on the south and 0.4H on the north. The result was in accordance with the apparent motion rules of the sun and the correlation was 0.983 between observations and calculations, though it was different from existing research. There were two possible reasons for this difference. One was that two scales were in different time spans respectively. The other reason was that this paper was based on the apparent motion rules of the sun and did not consider any aspects of plant ecology. Advantages and limitations of the model are listed which define how to use this model well with interrelated research.

Key words: slope; conical crown; the corresponding and imitating principle; shadow boundary; model

我国的人工林面积居世界首位,并以前所未有的速度递增;同时,我国是多山国家,多数人工林营建于坡地^[1],这些为开展人工林下作物、中药栽培提供了有利条件。

森林群落中,由于上层林冠的存在,直接导致林下的辐射量降低^[2],而光生态因子又是林下植被发育、生态系统作用过程关键的的决定性因素,其空间变化远大于其他任何植物可利用资源^[3]。树冠遮荫作为树冠辐射截留的集中表现,与林下包括太阳辐射在内的小气候特征具有密切关系^[4]。

随着生态学的发展,人们越来越倾向于用数学模型或生态模型来描述各种生态过程,其特点是关系简明,精确性较高^[5]。20世纪80年代以来已有一些关于树冠遮荫相关模型报道^[6~11],这些研究主要集中于单株树冠投影长度的定量计算、投影形状和变化的定性讨论、单株树冠投影面积的近似几何运算及采用简单累加或矩形法近似计算非单株树冠投影面积。所有这些研究均未考虑地形因素,也未考虑地面树木分布及阴影分布的位置要素,缺乏对植物、空间和时间尺度多个影响因子的综合考虑,造成其在分析坡面非单株树冠投影连续变化、邻体影响及环境模拟等方面的应用受到限制。

针对目前研究现状,本文着重在二维直角坐标系内,建立基于测树因子、地形、时间(包括时刻和日期)等变化要素的单木树冠坡面投影边界模型,并对其模拟效果和应用进行了验证与说明,为坡面人工林下环境,尤其是光环境动态变化的计算机模拟、预测和精确控制提供理论依据,同时也为邻体遮光干扰等研究提供一定的理论支持。

1 模型的建立

1.1 理论基础

常见树冠基本形状包括^[12]:①圆锥形,多为壮年针叶树,如落叶松、黑松等。②圆球形,如槐树等。③圆柱形,如黑杨等。3种冠形中,以圆锥形树冠投影情况最为复杂,以下讨论以此为例。

1.1.1 树冠的水平面投影 对任意圆锥形树冠(如图1(a)),树高 H ,枝下高 h ,半冠幅 r ,树冠锥顶 S ,圆锥底面圆心 P ,圆锥底角 $A(A = \arctg[(H-h)/r])$; I_b 、 I_c 分别为 $A \leq h_s < 90^\circ$ 和 $0^\circ < h_s < A$ 时的入射光线, h_s 为水平面太阳高度角;树冠剖面 $\triangle SAD$ (A 点位于阴面) 与入射光线平行且过圆锥轴线,树冠剖面 $\triangle SCE$ 与 $\triangle SAD$ 垂直相交于圆锥轴线; SF 、 SB 是光线照射下树冠阴、阳面交线(即阴线), G 为 B 、 F 中点。当 $A \leq h_s < 90^\circ$ 时, G 、 B 、 F 分别与 P 、 C 、 E 重合。

$A \leq h_s < 90^\circ$ 时,水平面投影是以 P 点为圆心,半径等于 r 的圆; $0^\circ < h_s < A$ 时,水平面投影是以 P 点为圆心, r 为半径的扇形和过圆外点 1 与圆相切的两直线围成区域^[13]。图1(b)、(c)中 1 、 A 及 $2 \sim 8$ 点分别是圆锥顶点 S 、圆锥底面 $A \sim G$ 及 P 点投影。 1 、 4 、 7 、 8 、 A 点共线,且位于树木主干投影上, 2 、 6 点是直线 l_{12} 、 l_{16} 与圆 8 切点。其中, 8 点为 4 、 A 中点, 7 点为 2 、 6 中点。

1.1.2 坡面投影与水平面投影关系 从光的直线传播原理出发,考虑到太阳光线入射的平行性,树木位于坡面上时,假设光线射向坡面形成阴影 P' 后,还可穿过坡面在水平地面上形成阴影 P_r ,则 P_r 与 P' 应为一对透视仿射对应(亲似对应),即图1(d)、图1(e)所示投影分别为图1(b)、(c)的亲似对应。平面圆心 8 点投影为椭圆圆心 8 点,圆的共轭直径投影后,共轭关系仍存在但垂直关系被破坏,平面投影上直线分点间线段比例、线与线的平行及点与线的从属关系在坡面上仍然成立^[14]。

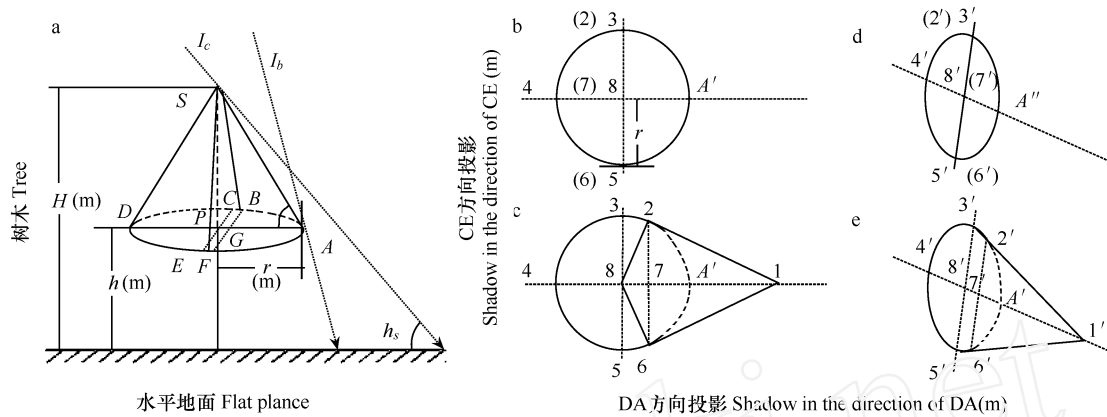


图 1 圆锥形树冠平面、坡面投影示意图

Fig. 1 Shadow of an individual conical crown on a flat plane and a slope respectively

(a) 树冠结构参数 structural parameters of a crown; (b) $A \leq h_s < 90^\circ$ 时的水平投影 shadow on a flat plane when $A \leq h_s < 90^\circ$; (c) $0^\circ < h_s < A$ 时的水平投影 shadow on a flat plane when $0^\circ < h_s < A$; (d) (b) 对应的坡面投影 shadow corresponding to (b) on a slope; (e) (c) 对应的坡面投影 shadow corresponding to (c) on a slope

1.2 直角坐标系的建立(图 2)

对任意坡度为 α 的坡面,取树木 OS 所在 O 点为原点,过 O 作坡面垂线 OP,令 OP 在水平面 w 上落影所在直线为 x 轴,落影反方向为正方向。 x 轴逆时针旋转 90° 得到 y 轴。 xOy 为 w 上的直角坐标系。将水平面 w 绕 y 轴逆时针旋转 α ,得到与坡面重合的平面 w' (即坡面 w') 及该平面上的直角坐标系 $x'Oy'$ 。这里, y 与 y' 轴重合,且为 w 与 w' 上投影对应的亲似轴。

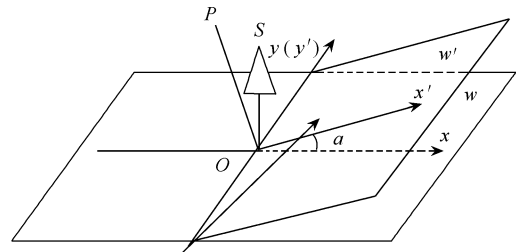


图 2 坐标系的建立

Fig. 2 Rectangular coordinate system

1.3 坡面 w' 上任意时刻投影边界函数

1.3.1 确定平面 w 上关键点坐标

(1) 参数介绍(图 3)

① 水平面太阳高度角 $h_s \in [0^\circ, 90^\circ]$; 太阳方位角 $A_s \in [0^\circ, 360^\circ]$, 南为 0° , 顺时针方向至东为 270° 。 h_s 、 A_s 均为地理纬度(ϕ)、经度(λ)、和时刻(t)的函数^[14]。这里, t 取值范围的计算与海拔(ht)有关^[14]。

② 坡向角 $\beta \in [0^\circ, 360^\circ]$, 南为 0° , 顺时针方向至东为 270° 。需实测。

③ $A_0 \in [0^\circ, 360^\circ]$, 为 x 轴逆时针旋转至树木主干投影的角度, 可借助 β 、 A_s 计算。

④ A 及 1~8 点是求投影边界的关键点。

(2) $0^\circ < h_s < A$ 时, 点坐标求算(图 3)

① 1 点 $x_1 = H \operatorname{ctg} h_s \cos A_0 = u_1$, $y_1 = H \operatorname{ctg} h_s \sin A_0 = v_1$;

② 4 点 $x_4 = (h \operatorname{ctg} h_s - r) \cos A_0 = u_4$, $y_4 = (h \operatorname{ctg} h_s - r) \sin A_0 = v_4$;

③ 8 点 $x_8 = h \operatorname{ctg} h_s \cos A_0 = u_8$, $y_8 = h \operatorname{ctg} h_s \sin A_0 = v_8$;

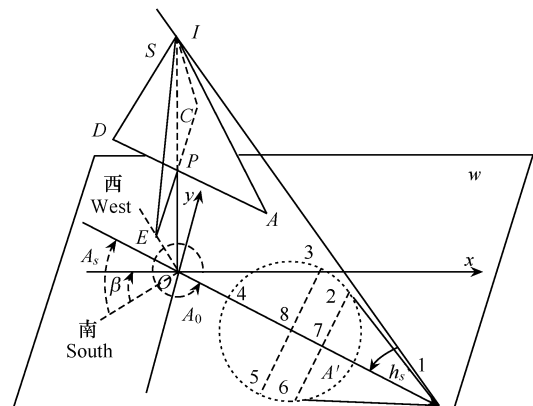


图 3 树冠水平面投影示意图

Fig. 3 Shadow of a crown on a flat plane

④ A 点 $x_A' = (h \operatorname{ctg} h_s + r) \cos A_0 = u_A'$, $y_A' = (h \operatorname{ctg} h_s + r) \sin A_0 = v_A'$;

连接 O_5 与 O_3 , $\angle O_5 = \angle O_3 = \arctg[r / |O_8|] \in [0^\circ, 90^\circ]$, 则

⑤ 3 点 $x_3 = (r^2 + h^2 \operatorname{ctg}^2 h_s)^{1/2} \cos(A_0 + \angle O_3) = u_3$,

$$y_3 = (r^2 + h^2 \operatorname{ctg}^2 h_s)^{1/2} \sin(A_0 + \angle O_3) = v_3;$$

⑥ 5 点 $x_5 = (r^2 + h^2 \operatorname{ctg}^2 h_s)^{1/2} \cos(A_0 - \angle O_5) = u_5$,

$$y_5 = (r^2 + h^2 \operatorname{ctg}^2 h_s)^{1/2} \sin(A_0 - \angle O_5) = v_5;$$

根据过圆外 1 点与圆 8 相切的条件, 切点 2、6 坐标可通过 x_1, x_8, y_1, y_8, r 的函数计算:

⑦ 2 点 $x_2 = f_2(u_1, u_8, v_1, v_8, r) = u_2$, $y_2 = g_2(u_1, u_8, v_1, v_8, r) = v_2$;

⑧ 6 点 $x_6 = f_6(u_1, u_8, v_1, v_8, r) = u_6$, $y_6 = g_6(u_1, u_8, v_1, v_8, r) = v_6$;

⑨ 7 点为 2、6 中点 $x_7 = (u_2 + u_6) / 2 = u_7$, $y_7 = (v_2 + v_6) / 2 = v_7$;

(3) $A \leq h_s < 90$ 时, 投影边界满足 $(x - u_8)^2 + (y - v_8)^2 = r^2$, $x \in [u_8 - r, u_8 + r]$ 。

1.3.2 确定坡面 w 上投影关键点坐标 坡面 w 上 1'~8'、A' 点分别为 w 平面上对应点的投影。

一般情况下, 基株 OS 的主干投影不会与 $y(y')$ 轴重合, 即 $u_i \neq u_i' \neq 0$ (如图 4)。

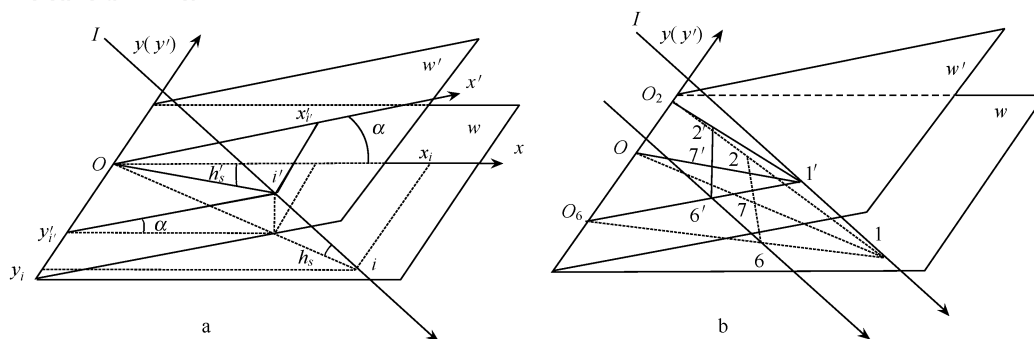


图 4 $u_i' \neq 0$ 时的坡面投影点与平面投影点关系示意图

Fig. 4 Relationship between the shadow boundary points on a plat plane and a slope when $u_i' \neq 0$

(1) i ($i = 1, 4, 7, 8, A$) 点坐标

① 图 4(a) 中坡面太阳高度角 $h_s' \in [0^\circ, 90^\circ]$, 是地理纬度 (ϕ)、坡度 (α)、坡向 (β) 和时刻 (t) 的函数^[15]。

② i 点: $D_i = |O_i| = (u_i^2 + v_i^2)^{1/2}$, 那么, $D_i' = |O_i'| = D_i \sin h_s / \sin h_s'$

$$x_i' = [D_i' \cos(h_s' - h_s) \cos A_0] / \cos \alpha = u_i', y_i' = D_i' \cos(h_s' - h_s) \sin A_0 = v_i'$$

(2) j ($j = 2, 6, 3, 5$) 点坐标

2 与 6'、3 与 5' 点分别对称, 对称点 7'、8' 已知, 则:

直线 l_{16} 与 y 轴交于点 $O_6(0, v_{06})$, 坡面上 1'、6' 亦与 O_6 共线, 6' 点满足于直线 l_{16} ; 同理, 2' 点满足于直线 l_{16} ; 再由对称条件, 可建立 4 个方程构成的线性方程组。据此, j (u_j', v_j'), 均可求得。

对于主干投影在 $y(y')$ 轴上, 即 $u_i' = 0$ 的特殊情况, i 点与 i 点重合; 同时, 由几何关系不难推出, $u_j' = u_j / \cos \alpha$, $v_j' = v_j [(h - u_j \operatorname{tg} \alpha) / h]$, $j = 2, 3, 5, 6$ 。推导过程略。

由于圆 8 上所有点均可求, 而椭圆 8' 上点与其一一对应, 利用 1.3.2(2) 方法可求 j 以外的任意其他点, 那末在任何情况下均足以满足求椭圆一般方程的需要。

1.3.3 边界模型 $Z(x', y')$ 在坡面直角坐标系 $x' O y'$ 内, 借助椭圆上 5 个互不重合的点, 解线性方程组, 得圆心为 8 的椭圆 $F(x', y') = a_1 x'^2 + a_2 x' y' + a_3 y'^2 + a_4 x' + a_5 y' + 1 = 0$; 借助直线上已求得的两点, 确定直线 $y' = l_{12}(x')$ 与 $y' = l_{16}(x')$ 相交函数为 $G(x', y') = [l_{12}(x') - y'] \cdot [l_{16}(x') - y'] = 0$, 那么阴影边界满足:

(1) $A \leq h_s < 90$ 时, $Z(x', y') = F(x', y') = 0$, 定义域 $D_Z =$ 椭圆定义域 D_F 。

(2) $0 < h_s < A$ 时, $Z(x', y')$ 是由椭圆 $F(x', y')$ 与直线相交函数 $G(x', y')$ 构成的封闭曲线, 通过直线 $y' = l_{26}(x')$ 进行如下分割:

① $u_2' \neq u_6'$ 且 $v_1' < 0$, 椭圆 $F(x', y')$ 在直线 $y' = l_{26}(x')$ 上方

$$Z(x', y') = \begin{cases} F(x', y') = 0, y' > l_{26}(x') \\ G(x', y') = 0, y' \leq l_{26}(x') \end{cases}$$

② $u_2' \neq u_6'$ 且 $v_1' > 0$, 椭圆 $F(x', y')$ 在直线 $y' = l_{26}(x')$ 下方

$$Z(x', y') = \begin{cases} F(x', y') = 0, y' > l_{26}(x') \\ G(x', y') = 0, y' \leq l_{26}(x') \end{cases}$$

③ $u_2' = u_6'$ 且 $u_1' > 0$, 椭圆 $F(x', y')$ 在直线 $y' = l_{26}(x')$ 左侧

$$Z(x', y') = \begin{cases} F(x', y') = 0, x' < u_2' \\ G(x', y') = 0, x' \geq u_2' \end{cases}$$

④ $u_2' = u_6'$ 且 $u_1' < 0$, 椭圆 $F(x', y')$ 在直线 $y' = l_{26}(x')$ 右侧

$$Z(x', y') = \begin{cases} F(x', y') = 0, x' > u_2' \\ G(x', y') = 0, x' \leq u_2' \end{cases}$$

定义域 D_Z 由 D_F 和 1 点决定。

2 模型的验证与分析

2.1 边界模型的模拟验证与分析

由于实际树木阴影面积较大,特别是形体高大的树木,而目前尚无准确测量树木阴影面积的合适方法,手工描绘投影边界、测量投影均会产生较大的测量误差,用这些实测值来验证理论计算结果,很难区分模拟效果的好坏是模型表达的问题还是测量误差造成的。所以本文以小型正圆锥体模拟树冠进行模型的验证。

任意选定:2005 年 12 月 15 日,以母线长 5.8cm 的正圆锥体模拟 $r = 2.9\text{cm}$ 的树冠, $H = 9\text{cm}$, $h = 4\text{cm}$ 。实验地点位于东经 $125^\circ 21'$, 北纬 $43^\circ 52'$, 坡向东偏南 22° (即 $\beta = 338^\circ$)、 $\alpha = 18^\circ$, $ht = 240\text{m}$ 。当日日照时间约为 7:00~16:00, 实验时间选择日照强度较大的 8:00~14:00, 每隔 1h 在坐标纸上绘出阴影边界, 与计算机数值计算的理论值比较(如图 5)。

边界按步长 0.5 对实测与计算曲线插值, 应用 SPSS11.0 进行 Spearman 及 Kendall's tau-b 相关性检验, 结果一致:各时段两曲线插值结果相关系数均大于等于 0.928 ($P \leq 0.01$), 表明该模型可较精确的模拟正圆锥体的坡面投影。由于实验以正圆锥模拟树冠, 边界差异主要来自计算误差及太阳辐射半影效应对实测边界描绘的影响。这一理由可解释图 5 中椭圆部分模拟效果较直线部分差且 8:00 与 14:00 的模拟差异相对较大的问题。

由于模拟实验的坡度、坡向为任意选定, 虽无法反映所有可能情况, 但具备一定的随机性。对于实际地形、实际树冠, 投影规律与模拟圆锥一致, 只是树冠锥体体积更大。所以, 该模型对实际树冠坡面投影模拟效果

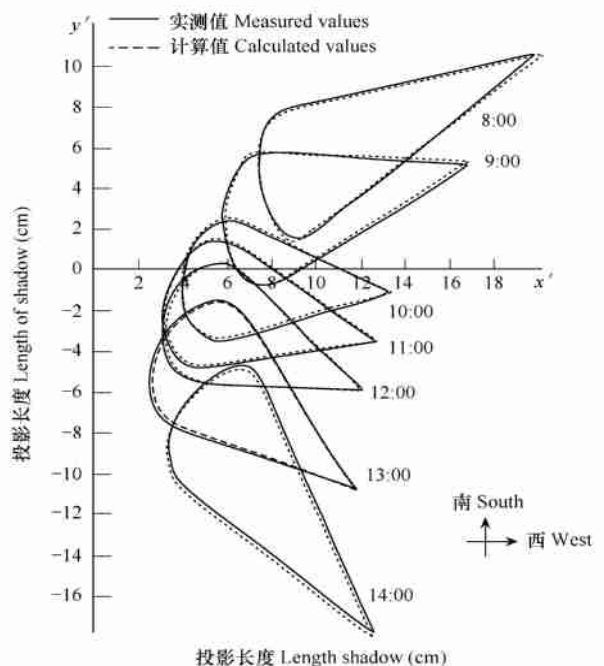


图 5 模拟圆锥树冠实测与计算投影比较

Fig. 5 Comparison of measured and calculated values of boundaries

的精确与否主要取决于树冠与正圆锥体的接近程度。

2.2 模型的实用验证

$Z(x', y) = 0$ 最直接的应用是通过积分进行遮荫面积计算,但除此之外还可根据其在坐标系内位置的变化,确定树木遮荫影响范围等。

长春南湖公园(东经 $125^{\circ}18'$ 、北纬 $43^{\circ}51'$)内,坡度 $\alpha = 10^{\circ}$ 的向南坡面 ($\beta = 0^{\circ}$) 上 12a 生樟子松 (*Pinus sylvestris*), $H = 3.55\text{m}$ 、 $h = 1.29\text{m}$ 、 $r = 1\text{m}$ 。按本文方法计算,单株树木在 2006 年 5 月 12 日 8:00~14:00 间树冠投影最远到达东 $0.69H$ (约 2.45m)、西 $1.18H$ (约 4.2m)、南 $0.2H$ (约 0.71m)、北 $0.45H$ (约 1.6m)。从这些数值上看,绝大多数阴影位于 8:00~14:00 近似扇环的理论投影边界区域内(如图 6)。这一范围虽与李树人等^[7]以基株为中心,东西 $2H$ 为长轴、南北 $1.5H$ 为短轴的近椭圆范围存在差异,但本文结果与北半球太阳视运动规律相符,且当日实际树冠投影观测结果为阴影最东到达 2.11m 、西 4m 、南 0.52m 、北 1.74m ,与理论值之间相关系数为 0.983 ($P = 0.008$),即计算与实际基本符合。

本结果与已有研究存在差异的可能原因有两个:①已有椭圆遮光范围是针对一年中每天 7:00~17:00 均适用而提出的,时间跨度大于本文,所以南、北、东、西投影均较长;②已有研究从生态场角度出发,考虑植物生态场作用特点和特征,而本文仅从太阳视运动规律出发,单纯反映树冠随太阳运动产生坡面投影实际位置的变化。

边界模型对遮荫影响范围的预测可在邻体遮光干扰、林下辐射分布等研究中发挥作用。

3 讨论与结论

综上,与其他现有遮荫模型相比, $Z(x', y) = 0$ 具有以下特点:

(1) 灵活性强 该模型考虑测树因子 (H 、 h 、 r)、地理位置特征 (ϕ 、 λ 、 ht 、 α 、 β) 及时间 (包括时刻 t 及日期 d) 等几乎所有对树冠投影有重要影响的变化因素,每输入一组变量值,都能求出与之对应的确定的边界表达式。虽然多变量也同时带来计算复杂、工作量大的问题,不过,在实际工作中,基于研究目的的不同,函数中包含的变量总有一些可以取为定值,甚至只剩一个变量。如研究选定地点阴影日变化,则 H 、 h 、 r 、 ϕ 、 λ 、 ht 、 α 、 β 及 d 均为定值,仅 t 是变量。确定的研究内容使变量数目减少、计算简单、模型表达具体化。

(2) 实用性强 $Z(x', y) = 0$ 弥补了已有相关模型未考虑地形因素和树木位置因素的不足,无论是从我国森林多分布于山地的实际出发,还是从环境动态模拟、量化的角度来讲都更具实用性:除了可通过积分求得阴影面积外,还可通过坐标平移得出林内任意与基株相对位置已知的树木投影边界,进而对林下阴影区、透光区、阴影交叠区域进行划分;可对林内任意选定区域的未来遮荫面积、邻体遮荫影响等进行理论计算;有了确定的坐标范围,还可将树冠遮荫的动态与林下辐射、温度、湿度变化乃至光、热传输联系起来,对确定位置的太阳辐射等环境因素进行定量,最终实现林下环境的模拟和预测。

(3) 局限性

① 该模型对阴影模拟效果的好坏主要取决于树冠与正圆锥体的相似程度。

② 模型在同龄人工纯林内应用更广泛。天然林和异龄林林分组成多样化,冠层结构存在较大的异质性,遮荫情况复杂,造成该模型的适用有限。

③ 由于日出后、日落前半影效应明显,模型在这段时期对实际阴影的模拟不可避免的存在较大误差,但这段时间内太阳辐射强度较小,植物的光合作用较弱,对于林下植物生长环境研究的意义不大,所以并不影响

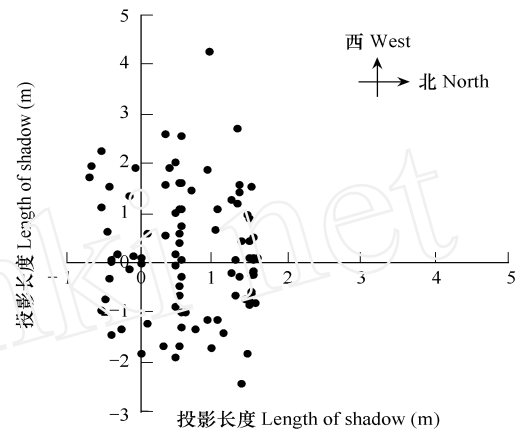


图 6 8:00~14:00 坡面树冠投影边界散点图

Fig. 6 Scatter plot of shadow boundaries from 8:00 to 14:00 on a slope

模型在林下植物生长环境研究中的实际应用。

了解模型的优点及局限性,灵活运用该模型进行合理的科学计算,可为坡面人工林下作物、中药栽培环境特别是光环境动态变化研究提供重要的理论依据。同时,本文对单株树冠投影边界函数的推导及结果也可作为进一步开展天然林、异龄林遮荫动态变化研究的基础。

References :

- [1] Zhang X Q, Xu D Y. A canopy radiation model for even-aged plantations I. theoretical calculations. J. of Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(5) : 609~615.
- [2] Bellow J G, Nair P K R. Comparing common methods for assessing understory light availability in shaded-perennial agroforestry systems. Agriculture and Forest Meteorology, 2003, 114(3-4) : 197~211.
- [3] Bazzaz F A. Plants in changing environments: linking physiological, population, and community ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [4] Richard Lee. Forest microclimatology. New York: Columbia University Press, 1978.
- [5] Wang D L. Some comments on ecological field. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3) : 472~476.
- [6] Wu L L, Wang Z C. A study on tree shadow movements. Journal of Nanjing Forestry University, 1991, 15(2) : 61~66.
- [7] Li S R, Zhao Y. Study on the shading mathematic model of tree crown. Acta Agriculture University Henanensis, 1994, 28(4) : 361~366.
- [8] Wu L L, Wang Z C. Tree screen effects on space. Journal of Nanjing Forestry University, 2000, 24(supplement) : 47~49.
- [9] Li S R, Zhao Y, Yan Z P. Light-ecological field of *Larix leptolepis* canopy. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(2) : 123~126.
- [10] Shen Q, Tang R N. A theoretical study on the number of trees in an interplanted tea stand. J. Biomath., 1994, 9(5) : 66~70.
- [11] Lu G Z, Bu Z D, Tian F J, et al. Study on shading of apricot intercropping with agricultural crops on the terrace land in the semiarid area of the western part of Liao ning. Protection Forest Science and Technology, 2005, 1(64) : 18~20.
- [12] Zheng W J. Arborea sinicae. Beijing: China Forestry Press, 1985.
- [13] Xu Z Q, Wu H X. Foundations of projection geometry. Beijing: Higher Education Press, 1987. 1~15.
- [14] Yao L H. Agriculture meteorology. Beijing: China Forestry Press, 1992. 198~199.
- [15] Bao F P. Mountain climates. Beijing: Science Press, 1983. 4.
- [16] Ma Q Y, Liu Z G, Pan X L, et al. A study on the canopy structure and light distribution of *Larix principis-rupprechtii* during the growing season. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22(4) : 18~21.
- [17] Eshetu, Yirdaw, Olavi Luukkanen. Photosynthetically active radiation transmittance of forest plantation canopies in the *Ethiopian highlands*. Forest Ecology and Management, 2004, 188(1-3) : 17~24.

参考文献:

- [1] 张小全,徐德应. 人工同龄林冠层辐射场模拟模型 I. 理论计算. 植物生态学报, 2001, 25(5) : 609~615.
- [5] 王德利. 关于生态场的几点评述. 应用生态学报, 2000, 11(3) : 472~476.
- [6] 吴力立,王宗淳. 树冠遮荫动态研究. 南京林业大学学报, 1991, 15(2) : 61~66.
- [7] 李树人,赵勇. 树冠遮光数学模型的研究. 河南农业大学学报, 1994, 28(4) : 361~366.
- [8] 吴力立,王宗淳. 林木对空间的遮蔽效应. 南京林业大学学报, 2000, 24, 增刊: 47~49.
- [9] 李树人,赵勇,阎志平. 日本落叶松林冠层光生态场研究. 应用生态学报, 1997, 8(2) : 123~126.
- [10] 沈泉,唐荣南. 林茶间作的理论基础研究. 生物数学学报, 1994, 9(5) : 66~70.
- [11] 卢国珍,步兆东,田福军,等. 辽西半干旱区梯田地杏农复合系统树木遮荫作用规律研究. 防护林科技, 2005, 1(64) : 18~20.
- [12] 郑万钧主编. 中国树木志. 北京: 中国林业出版社, 1983.
- [13] 许志群,吴海霞编. 射影几何基础. 北京: 高等教育出版社, 1987. 1~15.
- [14] 姚丽华主编. 农业气象学. 北京: 中国林业出版社, 1992. 198~199.
- [15] 傅抱璞著. 山地气候学. 北京: 科学出版社, 1983. 4.
- [16] 马钦彦,刘志刚,潘向丽,等. 华北落叶人工林生长季内的林冠结构和光分布. 北京林业大学学报, 2000, 22(4) : 18~21.