

林木个体影响林下太阳辐射分布的动态仿真

方 斌¹, 朱清科¹, 李文华², 秦 伟¹

(1 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】模拟林内光气候状况, 探讨防护林林下的遮荫胁地效应。【方法】在精确计算实验区太阳视运动轨迹的基础上, 采用椭球体模型, 用光量子计测量了36个试验点的太阳辐射强度值, 并统计了林下太阳辐射强度的日分布。建立了毛白杨树冠投影模型, 模拟了树荫的年内投影变化以及林下光气候状况。【结果】试验区树荫运动轨迹呈蝶形弧带变化, 树高影响投影外弧线位置, 枝下高影响投影内弧线位置; 在树体东、西侧1倍树高、北侧0.6倍树高范围内, 透光率小于90%, 在该区域发生林木遮荫胁地效应, 距树底点较近区域的胁地效应较强。遮荫面积在树体东、西侧最大, 南侧最小。【结论】在北回归线以北地区, 防护林带应尽量以东西走向成行种植, 南北成行种植时, 树底点与农作物应相隔一定距离, 以减小胁地效应; 对现存的防护林带, 应及时、适当地修剪防护林带的下部枝条, 减少遮荫胁地面积。

【关键词】 防护林; 毛白杨; 树荫轨迹; 辐射分布; 动态仿真

【中图分类号】 S718.55

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2008)06-0113-06

Dynamic emulation of the effects from individual tree to lower solar radiation distribution

FANG Bin¹, ZHU Qing-ke¹, LI Wen-hua², QIN Wei¹

(1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The study was to simulate the condition of light climate and research the function that umbrage hazard in shelter forest. 【Method】Based on the calculation of apparent trajectory of solar motion in the experimental area, and using quote ellipsoid distribution and the Monsi model, the radiation values of 36 experimental sites by light quantum meter were measured and statistics of daily solar radiation distribution from the values were calculated. Then the crown projection model was built, and the light climate condition in forest was simulated. 【Result】The trajectory of umbrage motion shaped a butterfly arc belt. The situations of outside and inner arc belt were influenced by height of tree (H) and the height below branch respectively. In the area of $1.0 \times H$ (in east and west of tree) and $0.6 \times H$ (in north of tree), transmittancy was below 90%, which meant umbrage hazard effect happened in this area. Additionally, the effect was stronger at bottom of the tree. The umbrage hazard area in the east and west of the tree was biggest, and smallest in the south. 【Conclusion】The shelter forest should be planted as much as possible toward east-west, and keep a certain distance between crops and forest when the shelter forest is north-south direction. Therefore, the umbrage hazard will be decreased in the north to the tropic of cancer. Cutting out the below branches of the existing shelter forest suitably and timely can reduce the area of umbrage.

* [收稿日期] 2007-12-19

[基金项目] “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A03); 北京林业大学研究生基金项目(06JJ024)

[作者简介] 方 斌(1983—), 男, 贵州兴仁人, 黎族, 在读硕士。主要从事数字流域与数字水文研究。E-mail: kaixinf@163.com

[通讯作者] 朱清科(1956—), 男, 宁夏彭阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复合农林学研究。E-mail: zhuqingke@sohu.com

Key words: protection forest; *Populus tomentosa* Carr.; variation of umbrage; solar radiation distribution; dynamic emulation

太阳辐射是绿色植物进行光合作用进而将光能转化为生物能的原动力。国外有关林木光照气候的研究始于 20 世纪 50 年代。1953 年, Monsi 和 Sae-ki^[1] 引用布格公式描述了植物群体内总辐射的衰减与叶面积指数的关系, 并提出了著名的 Monsi 模型。之后的学者对光照模拟模型的研究则主要集中于几何模型和统计模型两大类。Kastrov^[2]、Szwarcbaum^[3]、Jahake^[4] 和 Thornley^[5] 等用近似的几何体对单株植物进行模拟, 分别建立了圆柱体、球体、圆锥体和椭球体等几何模型。更具有代表意义的是 1983 年 Norman 等^[6] 建立的光照模型。上世纪 60 年代以来, 国内在这方面的研究也取得了很大进展, 王天铎^[7]、洪启法^[8] 对植物群落内的光强分布进行了研究; 贺庆棠等^[9] 测定了 3 种针叶树的光反射、透射与吸收率以及林内太阳总辐射的日变化规律; 崔启武等^[10] 从理论角度定性探讨了防护林的林冠结构与光分布特征; 刘乃壮等^[11] 和王汉杰^[12] 就农林间作系统的光环境进行了探索。

农田防护林是种植业生产的绿色生态屏障, 且可生产木材, 在构建和谐社会新农村、美化乡村环境等方面均具有重要作用。光在植物生长过程中称为光气候(Light climate), 在黄土高原农林复合生态系统中, 光作为一个重要的生态场因子, 其与水分、养分等环境因子共同影响并决定着植物的生长状况^[13]。农田防护林的林冠改变了农田光照条件, 对农林界面地段农作物的生长有重要影响。因此, 研究太阳辐射在林冠内的传输变化, 建立林木光照模型, 从而定量描述农田防护林内太阳辐射的分布状况, 确定林下作物光气候, 对减少防护林遮荫胁迫作用、提高林下作物产出及合理营造农田防护林体系具有重要的现实意义。本研究选取黄土高原地区常用的防护林树种毛白杨, 根据单株树冠的结构特征参数及研究区太阳运动轨迹方程, 建立了毛白杨单株树冠的林下投影模型, 并对林下光气候的时空分布状况进行了模拟, 探讨了防护林林下的胁地作用效应, 以期为黄土高原地区农田防护林体系建设及农林复合生态系统的配置提供理论依据。

1 试验地概况与研究方法

试验地位于山西省吉县, 地理坐标为北纬 36.29°, 东经 110.63°, 海拔 920 m。试验区为黄土

高原残塬沟壑区和梁状丘陵沟壑区的典型地区, 该区年降雨量 580 mm, 年平均气温 11 ℃, 多年平均日照时数为 2 563.8 h, 年平均无霜期 127 d, 属暖温带大陆性气候。土壤为褐土, 黄土母质。

选择 10 年生 3 行农田防护林带中的 1 株毛白杨树种为研究对象, 测量枝下高、冠长、冠幅、叶方位角、叶倾角、枝条着生角度等树冠结构参数, 采用在球体分布理论上发展起来的椭球体分布, 结合太阳高度角的变化模拟毛白杨树的冠投影。根据树冠投影模型和表达林冠内太阳光传输机理的 Monsi 模型, 绘制树荫随太阳高度角变化的运动轨迹。

以树底点为原点, 建立直角坐标系。在林下分时段(2 h)用光量子计测量 36 个点的光照强度, 并记录林下各点的坐标位置, 其中透光率为 10%, 30%, 45%, 60%, 75% 和 90% 的点分别有 4, 4, 6, 6, 8 和 8 个。设空地的地表辐射累计量为 R_0 , 林下受荫处辐射累计量为 R_i , 则林下透光率可表示为 $TSY/\% = R_i/R_0 \times 100\%$ 。再根据林下各试验点逐时段光照强度的累计量, 计算出透光率并绘制光照百分比强度分布图, 研究林下光气候的变化特征。

2 结果与分析

在较大尺度上, 太阳高度角、时角和地形是影响小气候形成的主要因素^[14]。山区的地形形态、山脉走向、坡位和坡度的变化, 直接影响着光照时间和辐射强度, 使气流产生变形, 进而使不同坡位单位面积上地被物获得的热量发生变化^[15-17]。在微观尺度上, 光气候的研究需着眼于植被的空间立体结构分析和模拟。地表植被系统是由苔藓和地衣、草本、灌木以及乔木树种组成的空间复层结构, 光照经植物冠层多次反射、吸收和透射后, 在林下形成了新的辐射强度分布。

2.1 太阳视运动轨迹的计算

太阳光是林木形成阴影的入射光源, 太阳视运动轨迹的变化引起光源入射角的变化。确定太阳的视运动轨迹, 关键是求得当时的太阳高度角(α)和时角(ω)。其计算公式组为:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega; \quad (1)$$

$$\delta = (\text{次日赤纬} - \text{当日赤纬}) \times (\text{年度修订值} +$$

$$\text{经度修订值} + \text{时间修订值}) + \text{当日赤纬}。 \quad (2)$$

式中: α 为太阳高度角, 是指太阳光线和观测点地平

线间的夹角; φ 为地理纬度; δ 为赤纬,是指在以地球赤道作为基本平面的赤道坐标系中,太阳离赤道面的角距离。当太阳在赤道面以北时, δ 为正值,太阳在赤道面以南时, δ 取负值。赤纬的逐日变化可以由日射观测常用表查得。由于常用表是1925年按经度零度以及时间为零点时计算的,所以求某地、某时刻的 δ 值时需经3种修订,即年度修订、经度修订和时间修订,但这3种修订值都可由日期订正表查得。

时角 ω 可由下式计算

$$\omega = (\text{真太阳时} - 12) \times 15; \tag{3}$$

$$\text{真太阳时} = \text{地方时} + \text{时差}; \tag{4}$$

$$\text{地方时} = \text{北京时} + (\text{当地经度} - 120) \times 4. \tag{5}$$

表 1 试验区太阳高度角的举例

Table 1 Example of solar altitude in experimental area

日期 Date	$\omega(^{\circ})$				$\delta(^{\circ})$				$\sin\alpha$	$\alpha(^{\circ})$
	地方时 Teilchron	时差/min Time difference	真太阳时 Apparent solar time	时角/ $(^{\circ})$ Hour angle	当日赤纬 Day declination	次日赤纬 Morrow declination	赤纬差 Declination difference	修订值 Revised value		
春分日(03-21) Vernal equinox	11:23 12:08	-8	11:15 12:00	-11.5 0	-0.1	0.3	0.4	0.2	0.790	52.15
									0.806	53.69
夏至日(06-22) Summer solstice	12:23 12:01	-1	11:22 12:00	-9.5 0	23.4	23.4	0	0.2	0.965	74.72
									0.975	77.11
秋分日(09-21) Autumnal equinox	13:23 11:53	7	11:30 12:00	-7.5 0	1	0.6	-0.4	0.2	0.809	53.95
									0.815	54.63
冬至日(12-22) Winter solstice	14:23 11:58	2	11:25 12:00	-8.75 0	-23.4	-23.4	0	0.2	0.496	29.74
									0.505	30.31

注:修订值指年度修订值、经度修订值和时间修订值之和。
Note: The revised values are the sum of annual revised value, longitudinal revised value and temporal revised value.

表 2 试验区日出日没时刻的举例

Table 2 Example of sunrise and sundown time-table in experimental area

时刻 Time	春分日(03-21) Vernal equinox	夏至日(06-22) Summer solstice	秋分日(09-21) Autumnal equinox	冬至日(12-22) Winter solstice
日出 Sunrise	06:03	04:46	05:47	07:07
日没 Sundown	18:12	19:17	17:59	16:49

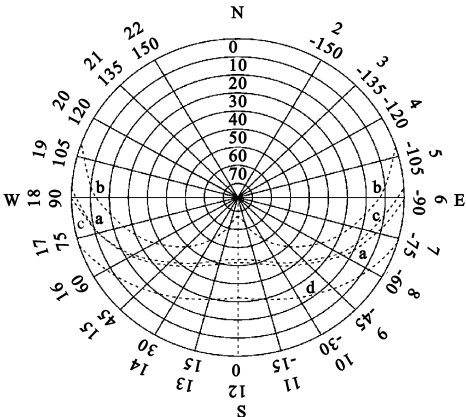


图 1 试验区太阳视运动轨迹图

a. 春分(03-21); b. 夏至(06-22); c. 秋分(09-21); d. 冬至(12-22)

Fig. 1 Illustration of apparent trajectory of solar motion in experimental area

a. Vernal equinox(03-21); b. Summer solstice(06-22); c. Autumnal equinox(09-21); d. Winter solstice(12-22)

太阳连续2次通过子午圈的时间间隔为1个真太阳时,把真太阳时进行24等分,每一等分为真太阳时1个小时,则1个真太阳时相当于15°。把真太阳时转化为角度,即为时角。以正午时(12:00)为0°,顺时针方向为正,逆时针方向为负。

在我国,以东经120°的地方时作为全国标准时,称为北京时。为了求得时角,需要把北京时换算成地方时,加上时差得到真太阳时。

研究区地理坐标为北纬 $\varphi = 36.29^{\circ}$,东经 $\lambda = 110.63^{\circ}$ 。正午太阳高度角计算结果见表1,从气象常用表查算出当地的日出日落时刻如表2所示,绘制出的太阳视运动轨迹见图1。

图1是吉县几个特殊日太阳视运动轨迹图,一天中太阳高度角以正午时(12:00)最大,而一年中,夏季的太阳高度角大于冬季。夏至日(06-22)日照时数最大,昼长夜短;冬至日(12-22)日照时数最小,表现为昼短夜长;春分(03-21)、秋分(09-21)昼夜时长相当,各为12 h。

2.2 太阳辐射的模拟模型

防护林和农作物在土壤中的相互作用主要表现为二者对水分和养分的竞争,地上部分则主要表现为林木的遮荫胁地效应^[18]。高层林木的遮荫作用使得林下和林荫内物种的光气候发生光照时长和辐射强度的变化,建立树冠投影模型,可直观地表达其变化情况。

2.2.1 树冠投影的模拟模型 冠层结构是指群落

中植物地上部分器官的数量和其空间排列方式,其要素包括植物叶、茎、枝、花和果实的形状、大小、着生位置和角度以及在时空上的动态变化,是决定冠层辐射各方向差异特征的基础^[19]。对植物冠层结构的研究是模拟植物-环境相互作用和植物群落生产力的基础环节。

毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.)是我国农田防护林建设中最常见的树种,其为木本植物,树冠宽卵形,具顶芽,单轴分枝,分长短枝,侧枝具趋光性,

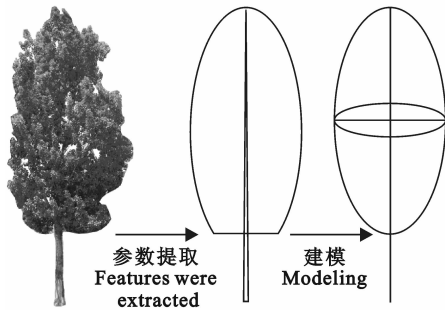


图2 毛白杨树冠的模拟图解

Fig. 2 Illustration of tree crown of *Populus tomentosa* Carr.

如图3所示,以树冠椭球体中心为坐标建立空间坐标系,则树冠上任意点的坐标可写成 $(X, Y, Z)'$ 。将坐标原点移至地面,则树冠上任意点的坐标变成 $(X', Y', Z')'$ 。其中:

$$\begin{cases} X' = X, \\ Y' = Y, \\ Z' = Z + \frac{h+H}{2}. \end{cases} \quad (6)$$

即原坐标系的圆点坐标为 $(X, Y, Z) = (0, 0, 0)$;在新坐标系下,其坐标为 $(X', Y', Z') = (0, 0, \frac{H+h}{2})$ 。

在上式中代入太阳光入射方向向量:

$$v = \frac{1}{1 + \tan^2 \omega} (\cos \alpha, \sin \alpha, \tan \omega)'. \quad (7)$$

根据坐标换基公式,则树冠投影模型可表示为:

$$\begin{cases} X'' = X - [Z + \frac{h+H}{2}] \cos \alpha \cdot \tan \omega, \\ Y'' = Y - [Z + \frac{h+H}{2}] \sin \alpha \cdot \tan \omega. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $X \in [-a, +a]$; $Y \in [-b, +b]$; $Z \in [h, H]$,其中 a, b 分别为直接测得的冠长和冠幅; H 为树高; h 为枝下高; α 为太阳高度角; ω 为时角^[13]。据此式即

其不断向冠幅外围生长和萌发新枝,扩大了树冠的受光面积,侧枝分枝角度为 $60 \sim 90^\circ$,为侧枝张开型,细枝较多。毛白杨为单叶互生树种,短枝叶面积略大于长枝叶。长枝叶呈宽卵形或三角状卵形,长 $10 \sim 15$ cm,宽 $7 \sim 13$ cm^[20]。叶片与水平面构成的叶倾角为连续分布,叶片与正北方向所成的叶方位角符合随机分布。由于毛白杨叶片角度符合椭球面分布的特征,故选择椭球体分布对其树冠进行模拟(图2)。

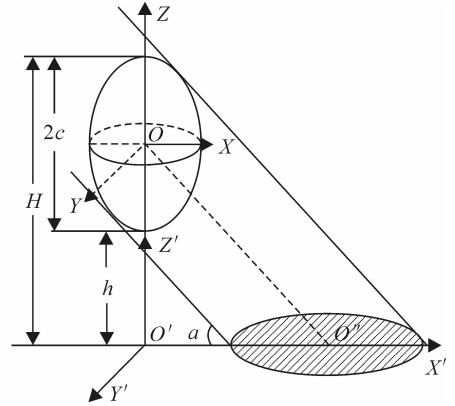


图3 毛白杨树冠的投影仿真图

Fig. 3 Emulation scheme of tree crown projection of *Populus tomentosa* Carr.

可计算出树冠上任意点投影到地面的阴影位置、阴影面积等相关数据。

由图3可见,太阳高度角影响着林冠投影的形状和面积,太阳高度角越大,树冠投影距树底点越近,投影面积越小,太阳光经过树冠的路径越长;树高越大,树冠投影距树底点越远,投影椭圆的长半轴越长,树冠遮荫面积越大;枝下高越小,树冠投影距树底点越近,投影椭圆的长半轴越长,树冠遮荫面积越大。因此,在营造农田防护林时,可适当修剪树体下部枝条,增大枝下高,减少遮荫面积。

2.2.2 太阳辐射在树冠的传输 太阳辐射通过叶层的衰减,与冠层透光率、辐射强度和辐射穿过的叶片层数存在比例关系。根据 Monsi 模型积分得:

$$I = I_0 \cdot e^{-(a+b) L_m \cdot z}. \quad (9)$$

式中: I 为出射光强; I_0 为入射光强; a, b 分别为反射和吸收系数; L_m 为叶面积密度; z 为入射光在叶层中的传输路径长。可见,叶面积密度越大、光传输路径越长,则林冠消光越多。

如果不考虑叶片在其生长过程中的形态变化,那么影响叶片遮荫效应的主要因素是太阳高度角。由毛白杨单叶反射率和透射率的实测数据(表3)可

知,单叶的反射率和透射率均与太阳高度角呈反比关系,中午时的太阳高度角最大,反射率和吸收率均最低。

表 3 毛白杨单叶反射率和透射率的日变化(2007-08-21)

Table 3 Daily variation of reflectivity and transmittancy from single leaf of *Populus tomentosa* Carr. (2007-08-21) %

时间 Time	反射率 Reflectivity	透射率 Transmittancy	时间 Time	反射率 Reflectivity	透射率 Transmittancy
09:00	14.9	10.4	13:00	11.5	6.7
10:00	12.8	8.2	14:00	13.0	8.4
11:00	11.2	6.5	15:00	14.7	10.3
12:00	9.7	5.4	16:00	16.1	11.1

2.3 辐射传输的动态仿真

2.3.1 树荫的运动变化轨迹 根据光在林冠中的传输状况,结合太阳视运动轨迹计算结果,可用树冠投影模型模拟树荫的年内运动变化。本研究选取 1 年中特殊的 4 个节气日(春分、夏至、秋分、冬至),计算出树冠投影模型仿真树荫运动变化的年运动轨迹(图 4)。由图 4 可知,随着太阳高度角的不断变化,单株立木树荫的林下投影位置在年内呈蝶形弧带状变化,夏至日与冬至日的投影分别位于弧带南北两

端。以树底点为始点,弧带的运动按夏至-秋分-冬至的顺序,逐日向北移动;冬至日以后,弧带则按冬至-春分-夏至的顺序逐日南移。单日投影带以正午为对称点,上午与下午投影带间的夹角按夏至-秋分-冬至的顺序逐日变小;冬至日以后,夹角则按冬至-春分-夏至的顺序逐日增大。日出、日落时段的树荫模糊不清,可忽略不计,则试验区树荫的年内变化范围介于 $(\pm 8a, 2b)$ (a 为冠长, b 为冠幅)之间。

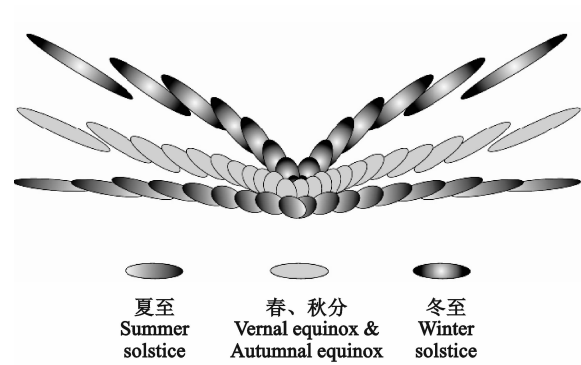


图 4 单株立木树荫的年变化轨迹

Fig. 4 Illustration of umbrage annual move track from isolated tree

2.3.2 树荫下的光强分布 仅有树荫的变化轨迹和遮荫面积,还不足以表达林下光合环境和林木遮荫胁迫等效应的特点。为研究林下光气候状况,直观地表达林下光环境的变化,还需要计算林下逐日受荫时间和遮荫强度的分布。在透光率大于 90% 的区域,光强与无林地无明显差异^[13]。因此,设定树底点为原点,以透光率为 90% 的远树点为界,根据所测量的 36 个试验点数据,绘制了林下辐射百分比强度分布图。图 5 即为试验区防护林带内冠幅为 3.0 m,冠长为 5.9 m,枝下高为 2.8 m,树高为 8.7 m 的 10 年生毛白杨盛叶期(8 月)林下日辐射百分比强度分布图。

由图 5 可见,以树底点为中心,透光率小于

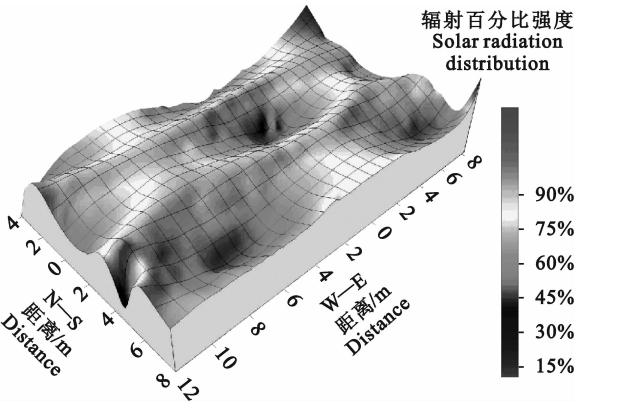


图 5 林下辐射百分比强度的分布

Fig. 5 Illustration of solar radiation distribution under trees

90% 的区域在东西方向位于 1 倍树高范围内,在北面则位于 0.6 倍树高范围内;树体东西两侧受荫范围较大,辐射强度变化梯度较小,南北侧受荫范围较小,辐射变化梯度较大;在离树体较远的区域,遮荫强度较低,透射率较高,辐射强度也越大;在距树底点越近的区域,透光率较低,辐射强度较小,林带对该区域农作物有遮荫胁迫效应。由于试验区位于北回归线以北,故树体南面的成荫面积最小。

3 小结与讨论

通过模拟试验区树荫变化轨迹和统计林下光强分布状况,得到以下结论:

1) 本研究采用的树冠投影模型能较好地对试验

区的林冠投影进行动态仿真。

2)通过树冠投影模拟分析可知,太阳高度角影响林冠的投影面积。光强一定时,太阳高度角越大,光照经过林冠的路径越长,消光越多,树冠投影面积越小。

3)林下遮荫仿真分析表明,树冠组分和形状影响林下受荫范围,试验区树荫运动轨迹呈长度有限的蝶形弧带变化,按春分-夏至-秋分-冬至-春分的顺序逐日循环运动。树高影响外弧线位置,枝下高影响内弧线位置。

4)林下透光的仿真结果显示,以树底点为中心,在试验区 10 年生毛白杨防护林带的投影范围内,树体东西侧 1 倍树高、北侧 0.6 倍树高范围内透光率小于 90%。距树底点较近区域的林带遮荫胁地效应较强。遮荫面积在树体东、西侧最大,南侧最小,北侧居中。

对农林复合系统内各生态因子特征的探讨,是研究防护林与农作物相互作用的基础。本研究对林下树冠投影和光强分布进行了仿真,为探讨农林复合系统内气流特征^[21]、水肥分异性^[22]等相关研究提供了有益的补充。

农田防护林的遮荫作用不仅影响林下太阳辐射强度,还造成林下光质的改变。光质的变化会直接影响植物器官的生长发育,进而影响林下植物的活力^[23]。因此,对林下光气候的研究,还有待于进一步增加林木对光质影响的探讨。

[参考文献]

[1] Monsi M, Saeki T. Uber den Lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung fur die Stoffproduktion [J]. Jap J Bot, 1953, 14: 22-52.

[2] Kastrov U G. On the diurnal course of the albedo of the Earth's surface Trans [J]. Aerol Obs, 1955, 14: 12-22.

[3] Szwarcbaum I. A montecarlo model for the radiation field in plant canopies [J]. Agricultural Meteorology, 1976, 17: 333-352.

[4] Jahake L S. Influence of photosynthetic crown structure on potential productivity of vegetation based primarily on mathematical models [J]. Ecology, 1965, 46: 319-326.

[5] Thornley J H M. A model of nitrogen flows in grassland [J]. Plant, Cell and Environment, 1989, 12: 863-886.

[6] Norman J M, Wells J M. Radiative transfer in an array of canopies [J]. Agron J, 1983, 75: 481-488.

[7] 王天铎. 水稻群体的光强分布与光合作用的计算模型 [C]//殷宏章. 稻麦群体论文集. 上海: 上海科学技术出版社, 1961: 33~50

Wang T D. Modeling of optical radiation distribution and pho-

tosynthesis from paddy rice group [C]// Yin H Z. Proceedings of paddy and wheat. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1961: 33-50. (in Chinese).

[8] 洪启法. 马尾松幼林小气候 [J]. 林业科学, 1963, 8(4): 275-289.

Hong Q F. Micro microclimate of *Pinus massoniana* young stand [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1963, 8(4): 275-289. (in Chinese)

[9] 贺庆棠, 刘祚昌. 森林的热量平衡 [J]. 林业科学, 1980, 16(1): 24-33.

He Q T, Liu Z C. Thermal balance of forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1980, 16(1): 24-33. (in Chinese)

[10] 崔启武, 朱劲伟. 林冠的结构和光的分布——光的透射和反射理论 [J]. 地理学报, 1981, 36(2): 196-208

Cui Q W, Zhu J W. Forest canopy structure and optical radiation distribution—Theory of optical Transmission and reflection [J]. Acta Geographica Sinica, 1981, 36(2): 196-208. (in Chinese)

[11] 刘乃壮, 熊勤学. 农桐间作农田太阳辐射分布的计算机模拟 [J]. 泡桐与农用林业, 1990(2): 18-29.

Liu N Z, Xiong Q X. Simulating of solar radiation on intercropping farmland of crop plant and *Paulownia* [J]. Paulownia and agro-forestry, 1990(2): 18-29. (in Chinese)

[12] 王汉杰. 混农林业生态系统内部的光能分布 [J]. 生态学杂志, 1991, 10(1): 27-32.

Wang H J. Solar energy distribution in agroforestry ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 1991, 10(1): 27-32. (in Chinese)

[13] 卢琦, 赵体顺, 师永全, 等. 农林业系统仿真的理论与方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.

Lu Q, Zhao T S, Shi Y Q, et al. Theory and methodology on simulating agroforestry system [M]. Beijing: China Environment Science Press, 1999. (in Chinese)

[14] 贺庆棠. 气象学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.

He Q T. Aerography [M]. Beijing: China Forestry Press, 1986. (in Chinese)

[15] 刘生, 邱新法, 王潇宇. 起伏地形下我国太阳散射辐射分布式模拟 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 371-376.

Liu S, Qiu X F, Wang X Y. Distributed modeling of diffuse solar radiation over rugged terrains of China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(3): 371-376. (in Chinese)

[16] 傅抱璞. 不同地形下辐射收支各分量的差异与变化 [J]. 大气科学, 1998, 22(3): 178-190.

Fu B P. The difference change of income and expenses ingredients of solar radiation over different terrains [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1998, 22(3): 178-190. (in Chinese)

[17] 曾燕, 邱新法, 刘绍民. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1028-1033.

Zeng Y, Qiu X F, Liu S M. Distributed modeling of extraterrestrial solar radiation over rugged terrains [J]. Chinese Journal of Sinica, 2005, 48(5): 1028-1033. (in Chinese)