南京气象学院学报
一九七九年　第二期

农田植被中的光能分布*

翁笃鸣　钱林清**　沈觉成
陈万隆　高家表　金　龙

研究太阳光能在农田植被中的传播，对于了解农田小气候形成以及农业生产都具有重要的意义。这个问题在国内外进行过不少研究，但由于农田植被的复杂性以及观测方法上的困难，人们对其了解还很不充分。本文根据在山西交城的一些实测结果，试图提供有关这方面的某些新的事实和认识。

一、总光强、直射光强、散射光强在农田中的铅直分布

在文献中一般只讨论总光照在农田中的分布规律性，显然，这是不够的。因为总光照由直射光强和散射光强组成，由于它们各自的传播方式不同，对作物生长的作用也不一样，所以分别讨论似乎更恰当些。

根据连续5个晴天的实测，得到冬小麦田中各时刻总光强、直射光强和散射光强的平均铅直分布（图1）。可以看出，三种光强的分布曲线基本上是相似的：都从植株顶部向下递减并都在开始时递减较慢，然后在植被的中间层迅速削弱，再往下递减速度又缓和下来。我们从对其它作物（玉米、谷子、高粱、水稻等）的观测中也发现有类似情况。显然，这带有普遍性，是与作物叶面积的铅直分布相联系的。

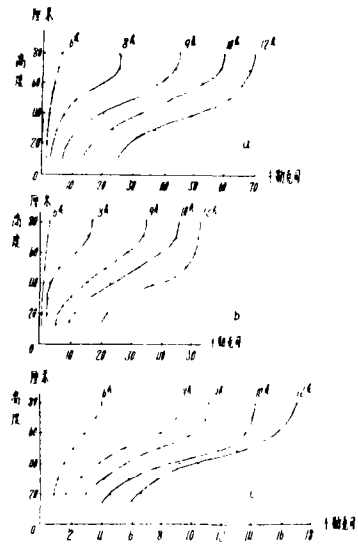

图1　小麦田中各时刻总光强(a)直射光强(b)和散射光强(c)的铅直分布　山西交城　株高95cm　1978年6月8日—12日平均

如果利用透光率（相对照度）来表示总光强、直射光强和散射光强在农田中的分布状况，就可揭示出各种光强的相对递减速度差异，图2即为总光照、直射光和散射光的透

*参加观测的还有气候专业七五级学生张造和、张承义、陈佩君、孙青宁、林爱和以及山西省气象局王建中同志。
**山西省气象科学研究所。

光率的铅直分布。对比图1、2可以看出差别是比较明显的，主要表现在从7时至12时透光率的变幅上，对于直射光强，在植株50厘米高度上透光率增加了70%，而散射光仅增加26%，这说明太阳视位置对农田透光率变化的重大作用。总光照透光率曲线界于它们之间，但与直射光透光率曲线接近。

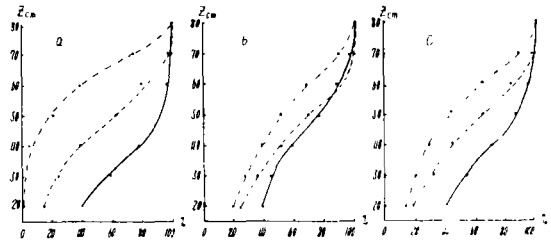

图2　晴天不同时刻小麦地中直射光(a)、散射光(b)、总光照(c)的透光率的铅直分布　交城　株高95cm　行距20cm　行向东一西　1978年6月8日—12日

表1(见下页)为小麦地各高度总光强、直射光强和散射光强日总量及其日平均透光率的分布。由表1可见，就农田中太阳光能日总量分布来说，无论是总光强、直射光强，或散射光强其铅直分布曲线(图略)形式与图1是一致的。但有趣的是它们各自的日平均透光率几乎完全相同，这表明，农田对于太阳光能(各分量)日总量传播的影响，基本上是由作物本身特征(密度、株型、生育期等)所决定的，而与太阳周日视运动关系较小。这一点很重要，因为它揭示了这样一种可能性，即就全日总量来说，为了合理地利用太阳光能，只要培育最适宜的株型就可以了，而不必估计太阳视运动的可能影响。

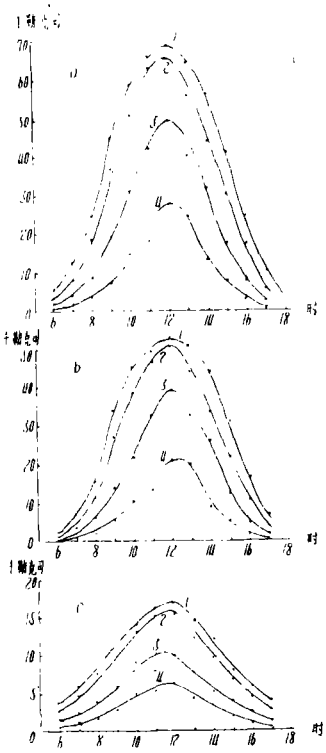

图3　晴天小麦地中各高度总光强(a)、直射光强(b)和散射光强(c)的平均日变化　交城　株高95cm　1978年6月8日　1.-80cm　2.-60cm3.-40cm4.-20cm

到达农田作物层中各高度的太阳光能，同露地一样具有明显的日变化，只是由于植被的影响，太阳光能随深度显著减弱(图3)。农田中各高度的透光率也有明显的日变化。

二、农田植被对太阳光能的分层吸收

太阳光能在农田中的分布特点是与作物的吸收作用相关联的。为了计算农作物对太阳光能的分层吸收，我们考虑可把作物层由地面至植株顶部分成若干层，对于其中任一层(第i层)，它所吸收的太阳光能可由下式表示：

$$\Delta Q_i = Q_i\ (1-A_i-K_i)+ \\ +q_i\ (1-A_i'-K_i) \qquad (1)$$

这里ΔQ_i为第i层吸收的太阳光能(总的照度)；Q_i为到达该层上表面的太阳光能；A_i和A_i'分别为该层植物体上表面和下表面对太阳光能的反射率；K_i为该层植被的透光率；

表1　晴天小麦地中各高度总光强、直射光强、散射光强日总量和日平均透光率分布　株高95厘米，行距20厘米　1978年6月8—12日

高度（厘米）	光能日总量（千勒克司·小时）			日平均透光率（%）		
	总光强	直射光强	散射光强	总光照	直射光	散射光
对照	495.0	363.1	131.9	100	100	100
80	488.6	360.0	128.6	99	99	97
70	470.6	346.1	124.5	95	95	94
60	409.4	298.0	111.4	83	82	84
50	332.2	243.6	88.6	67	67	67
40	256.7	191.7	65.0	52	53	49
30	187.5	139.7	47.8	38	38	36
20	126.1	89.9	36.2	25	25	22

q_i为由下向上到达该层底面的光能。

在通常情况下，由于植被的吸收作用，q_i一般比较小，比之Q_i可忽略不计。所以，植被任一层吸收的太阳光能，可写成：

$$\Delta Q_i \approx Q_i\ (1-A_i-K_i) \qquad (2)$$

考虑到K_i的定义，有$K_i=\frac{Q_{i+1}}{Q_i}$，这里Q_{i+1}为透过第i层（到达第i+1层）的光强，于是（2）式还可写成

$$\Delta Q_i \approx (1-A_i)\ Q_i-Q_{i+1} \qquad (3)$$

Q_i、Q_{i+1}都可在田间测到；原则上A_i也能观测，但粗估一下就可以了。由于A_i表示第i层的反射率，应当正比于该层植被的有效受光叶面积，一般绿色植物对生理活动辐射的反射率，按Ross[1]的测定是比较小的——仅9%。换句话说，对于第i层，即使有效受光叶面积的相对值为1（叶面完全复盖），A_i也不过是9%，实际上总要比9%小（据我们实测绿色植物对可见光的反射率在5.4—7.0%间）。所以，在第一近似上我们可取

$$\Delta Q_i \approx Q_i-Q_{i+1} \qquad (4)$$

这是对总光强的吸收情况，对直射光强、散射光强的吸收相应有

$$\Delta S' \approx S_i'-S_{i+1}' \qquad (5)$$

$$\Delta D \approx D_i-D_{i+1} \qquad (6)$$

根据上述方法，我们实际上计算了小麦地中厚度为10厘米的各层的ΔQ_i、ΔS_i和ΔD_i，得到很有意义的结果。图4就是各层吸收的总光强在上

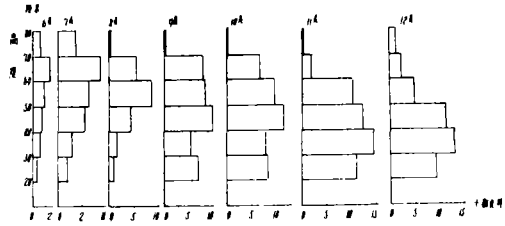

图4　晴天小麦地中各时刻分层吸收太阳光能的情况
交城　株高95cm　1978年6月8日—12日

午的逐时演变情形。该图表明，植被各层吸收的太阳光能从日出开始至正午，随着太阳高度的增加，吸收辐射最多的层是逐步由上向下移动的，早上，6—7时，最大吸收层在60—70厘米高度；8时降至50—60厘米；9—10时再降至40—50厘米；待至11—12时降至最低——30—40厘米。下午的情形也大致如此。

植被吸收太阳光能的此种规律性，可从植被中CO_2的铅直分布规律中得到印证[2]。所以，可以这么说，在日间凡是吸收光能最多的一层，也是作物光合作用最强的一层，因而也是CO_2浓度最低的一层。

表2　小麦地各层吸收的太阳光能日总量（千勒克司·小时）1978年6月8—12日　交城

层次（厘米）	$\sum Q_i$	$\sum S_i'$	$\sum D_i$
80厘米以上	6.4	3.1	3.3
70—80	18.0	13.9	4.1
60—70	61.2	48.1	13.1
50—60	77.2	54.4	22.8
40—50	75.2	51.9	23.6
30—40	69.2	52.0	17.2
20—30	61.4	49.8	11.6
0—20	126.1	89.9	36.2

当然，农田植被中各层吸收太阳光能的多少，一方面与太阳高度角有关，另一方面与植物体密度的铅直分布相联系。我们统计了农田中各层吸收的总光强，直射光强和散射光强的日总量（表2）发现其最大吸收层基本上稳定在50—60厘米一层，亦即植株三分之二高度向下的一层。正是在这层，植物密度最大，吸收的太阳光能最多。从表上我们还看到，漏到20厘米至地面的光照还是比较多的，这部分光能如能更充分利用，会对作物增产起作用。

三、农田中光能分布的半经验半理论描述

1953年Monsi和Saeki[2]最先提出描述光能在农田植被中传播的公式

$$S_y' = S' \cdot e^{-\alpha F(y)} \tag{7}$$

式中S'为到达植被上表面的光强；α为植物叶片的消光系数；F(y)为由植被顶部向下累积的叶面积指数，它是距植株顶部高度y的函数。这实际上是Beer定律的一种应用，这种模式假设植被是均匀的介质，并吸收全部入射光，而且天空散射是各向同性的。虽然，这些假设条件与实际情况不完全符合，但由于它考虑到植被中累积叶面积指数的铅直变化这一主要因素，所以直至现在仍被认为是比较符合实际的。可是，问题是累积叶面积指数仍然是一个难于确定的参数，而且对各种作物以及不同生育期都不相同，因此在实用上有困难。文献[3]的作者也作了这方面的简单描述。

我们认为要建立计算农田光能分布的实用模式，关键在于合理地考虑作物垂直结构特点。根据对玉米、谷子、高粱、水稻等作物抽穗、乳熟期的观测，其相对叶面积密度函数f(y)的经验分布如图5所示。所谓相对叶面积密度函数，可定义为

$$\frac{F(y)}{F} = \int_0^y f(y)\,dy \tag{8}$$

式中F（y）为单株植物累积叶面积（由植株上表面计量至高度y）；F为全株作物总叶面积；f（y）就是相对叶面积密度函数，这是从概率密度函数的概念引用的，它与概率密度函数很相似。密度函数f（y）是由经验途径得到的。

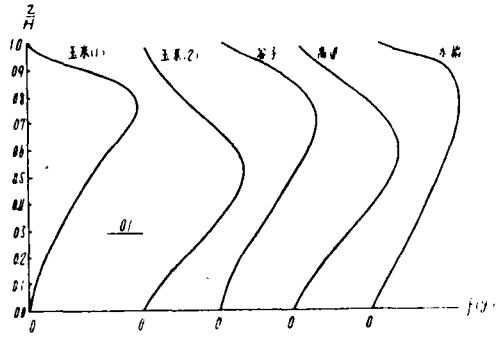

图5　各种作物的相对叶面积密度函数f(y)曲线 8月25日测（1）拔节期（2）灌浆期

由图5可见，作为一种最简单的处理，各种作物的相对叶面积密度函数可用两条直线拟合，其交点就是曲线中最大值的出现部位，对各种作物分别为

玉米	谷子	高粱	水稻
$\frac{3.5}{7}H$	$\frac{5}{7}H$	$\frac{4}{7}H$	$\frac{5.5}{7}H$

平均可取$\frac{2}{3}H$（H为株高），所以，相对叶面积密度函数有

$$\left.\begin{aligned} f(y)&=a'y=a'(H-z) \\ f(y)&=a(H-y)=az \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &H\geqslant z\geqslant\tfrac{2}{3}H \\ &\tfrac{2}{3}H\geqslant z\geqslant 0 \end{aligned} \qquad (9)$$

式中a，a'为系数。这里我们把y改用比较习惯的植株高度H和高度z表示，它们的联系有

$$y=H-z$$

在两条直线交点（$z=\frac{2}{3}H$）处，（9）式的两式相等，必定存在a'=2a，于是（9）式可改成

$$\left.\begin{aligned} f(y)&=2a(H-z) \\ f(y)&=az \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &H\geqslant z\geqslant\tfrac{2}{3}H \\ &\tfrac{2}{3}H\geqslant z\geqslant 0 \end{aligned} \qquad (10)$$

现在我们分析光能在作物地中传播的情形。在植被中光能通过元量小体积δy的削弱量为

$$dS=-S\cdot\alpha n\delta F(y) \qquad (11)$$

这里S为入射光强；α为消光系数；n为作物密度；nδF（y）为元量体积中所包含的叶面积，根据（8）式，上式可改写成

$$dS=-S n\alpha F\cdot f(y)dy \qquad (12)$$

再考虑对于植被中不同高度f（y）的形式（10）式，可分别写出在植被中上下两层的光能削弱量为

$$\left.\begin{aligned} dS&=-S\alpha_1 n F\,2a(H-z)d(H-z) \\ dS&=-S\alpha_2 n F a z d(\tfrac{2}{3}H-z) \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &H\geqslant z\geqslant\tfrac{2}{3}H \\ &\tfrac{2}{3}H\geqslant z\geqslant 0 \end{aligned} \qquad (13)$$

式中把上下层的消光系数分别开来是必要的，因为在作物的上部和下部，叶片的含水

量、厚度、颜色等特征都不相同，消光系数应当有所不同，所以写成α_1和α_2。其次，对下层建立消光方程时，它的上限高度是$\frac{2}{3}H$，因此，（13）式第二式的写法是适当的。

于是，在植被上层（$H \geqslant z \geqslant \frac{2}{3}H$）任一高度上的光强$S_{z1}$通过积分(13)式中第一式可得

$$S_{z_1}=S\cdot e^{-\alpha_1 nFa(H-z)^2} \tag{14}$$

或 $$S_{z_1}=S\cdot e^{-b_1(H-z)^2} \tag{15}$$

这里$b_1=\alpha_1 nFa$为一系数，可通过经验途径得到。

对于植被下层（$\frac{2}{3}H \geqslant z \geqslant 0$），积分（13）式中第二式，有

$$S_{z_2}=S_{\frac{2}{3}H}\cdot e^{-\frac{1}{2}\alpha_2\cdot nFa\left[(\frac{2}{3}H)^2-z^2\right]} \tag{16}$$

式中$S_{\frac{2}{3}H}$表示在作物$\frac{2}{3}$高度处的光强，按（15）式它等于

$$S_{\frac{2}{3}H}=S\cdot e^{-b(\frac{H}{3})^2} \tag{17}$$

将（17）式代（16），可得

$$S_{z_2}=c\cdot S\cdot e^{b_2 z^2} \tag{18}$$

这里 $c=\exp[-(b_1+2\alpha_2 nFa)(\frac{1}{3}H)^2]$；

$b_2=\frac{1}{2}\alpha_2\cdot nFa$

因此，综合（15）和（17）式，光能在作物地中的分布的普遍式为

$$\left.\begin{aligned} Sz_1&=S\cdot e^{-b_1(H-z)^2} \\ S_{z_2}&=c\cdot S\cdot e^{b_2 z^2} \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &H\geqslant z\geqslant \tfrac{2}{3}H \\ &\tfrac{2H}{3}\geqslant z\geqslant 0 \end{aligned} \tag{19}$$

或以透光率K表示，则有

$$\left.\begin{aligned} K_{z_1}&=e^{-b_1(H-z)^2} \\ K_{z_2}&=c\cdot e^{b_2 z^2} \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &H\geqslant z\geqslant \tfrac{2}{3}H \\ &\tfrac{2H}{3}\geqslant z\geqslant 0 \end{aligned} \tag{20}$$

这些结果表明，在农田中光强（或透光率）的铅直分布，一般可分两段，上段在$\frac{2}{3}$株高以上，下段在$\frac{2}{3}$株高以下，它们都遵循高斯曲线由上而下递减。这些曲线形式应当对各时刻的总光强、直射光强和散射光强都合适。只是所取系数b_1、b_2、c不同而已。

我们以小麦地12时实测资料为例，完成曲线拟合工作。对于总光强Q、直射光强S′、散射光强D可有

$$\left.\begin{aligned} Q_{z_1} &= 1.001Q\cdot e^{-0.5083(H-z)^2} \approx Q\cdot e^{-0.5083(H-z)^2} \\ Q_{z_2} &= 0.391\cdot Q\cdot e^{3.417z^2} \end{aligned}\right\} \begin{aligned} &H\geqslant z\geqslant \tfrac{2}{3}H \\ &\tfrac{2}{3}H\geqslant z\geqslant 0 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\left.\begin{aligned} S_{z_1}' &= 0.99S'\cdot e^{-0.325(H-z)^2} \approx S'e^{-0.325(H-z)^2} \\ S_{z_2}' &= 0.369S'\cdot e^{3.895z^2} \end{aligned}\right\} \begin{aligned} &H\geqslant z\geqslant \tfrac{2}{3}H \\ &\tfrac{2}{3}H\geqslant z\geqslant 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\left.\begin{aligned} D_{z_1} &= D\cdot 1.05e^{-1.562(H-z)^2} \approx D\cdot e^{-1.562(H-z)^2} \\ D_{z_2} &= 0.339\,e^{3.333z^2} \end{aligned}\right\} \begin{aligned} &H\geqslant z\geqslant \tfrac{2}{3}H \\ &\tfrac{2}{3}H\geqslant z\geqslant 0 \end{aligned} \quad (23)$$

验算结果，透光率拟合误差都在0.05以下，同时还对玉米、谷子等作物地中的光强分布进行拟合，也比较满意。所以我们认为，采用（19）、（20）式描述光能在农田中的传播，可能比较恰当，而且经验拟合工作也容易做，无需进行累积叶面积系数的测定。

最后还需说明一点，我们从理论上推导（19）式时，没有考虑太阳光线入射角的影响，考虑这一点在理论上是简单的，只要在（19）式的指数部分乘上$\csc^2 h$就可以了。我们在拟合时虽未作单独考虑，但实际上在确定c、b_1、b_2时就已包括了$\csc^2 h$的影响。

四、农田中光能的水平分布

光能在农田中的水平分布可反映出边行效应的情况。由于直射光和散射光的传播方式不同，使得问题稍为复杂一些。我们曾测得东西行向麦垄中由南边行至北边行的散射光透光率水平分布（图6）。它表明，散射光透光率由两边行向中间递减，并具有一浅“U”形，一般从边行开始递减迅速，待深入2—3行后就基本上稳定下来。这种规律性在不同时刻都比较一致。

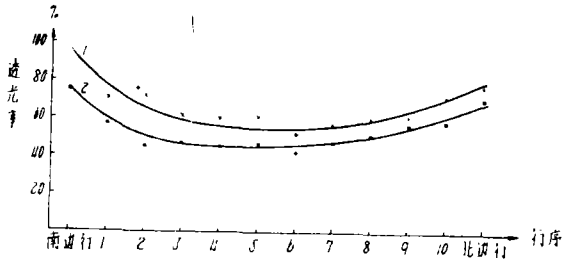

图6　麦田行向三分之二株高，水平方向散射光透光率的变化　交城　行向东—西；行距20cm；株高95cm　78年5月25日—31日

农田中光照的水平分布特点在各个高度上都有表现。表3为我们测得的逐行散射光透光率的铅直分布。可以看出，透光率由边行向里的水平变化在作物层的中部更明显。

表3　麦田各行间散射光透光率铅直分布(%)　1978年5月31日$11^h05'$阴　交城

行序 \ 高度(cm)	对照	90	80	70	60	50	40	30	20	10
第一行	100	97	79	66	58	36	24	15	9	8
第二行	100	97	82	66	45	34	22	12	9	5
第三行	100	97	81	60	40	28	21	12	7	-
第四行	100	89	81	61	40	21	14	10	8	-

至于直射光强透光率的水平分布情况，主要与太阳视位置有关。从理论上侧向光对农田的影响范围L可由下式表示[4]

$$L = y\,\mathrm{ctg}\,h\cos(A-\gamma) \tag{24}$$

这里y为测点至植株顶部高度（对于植株基部便是株高H）；h、A分别为太阳高度角和方位角；γ为株行法线方向。由(24)式可见，只有在h较小的早晚时刻，在植株的下部(y较大)以及株行与太阳的相对方位(A—γ)比较小时，L才较大，侧向光的影响才比较明显。但据我们结合半经验半理论的计算[4]，直射光透过不同行数植株时的透光率递减是十分迅速的(表4)。如以透光率10%以上作为侧向透光的作用范围，那么如表4所示，在离顶部40厘米处，水平透光影响范围可达4行，80厘米处仅1—2行。

表4　直射光透过不同行数时的平均透光率(%)

透过行数	1	2	3	4	5
离植株顶部40厘米	34.8	21.5	15.9	11.2	—
离植株顶部80厘米	25.2	6.6	5.4	4.7	8.0

小　结

1 农田中光能的铅直分布，主要由植被本身特征所决定，其基本特点是在顶部和基部递减慢，在中间层递减较快。

2 农田植被中各高度光强的日变化，具有与对照点(露地)相同的形式，只是由于植被的影响，光强由上而下递减。

3 计算农作物对光能的分层吸收，发现作物吸收太阳光能最多的部位是随太阳高度角增高而降低的，这个情况与国外对农田中CO_2含量垂直分布观测结果相一致。

4 根据对植被中相对叶面积密度函数的分析，我们提出描述光能在植被中传播的半经验半理论公式为：

$$\left.\begin{aligned} S_{z_1} &= S\cdot e^{-b_1(H-z)^2} \\ S_{z_2} &= c\cdot S\cdot e^{b_2 z^2} \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &H \geqslant z \geqslant \tfrac{2}{3}H \\ &\tfrac{2}{3}H \geqslant z \geqslant 0 \end{aligned}$$

经实际资料拟合，可适用于直射光强，散射光强和总光强计算。

5农田中光能的水平分布差异，一般只由边行向里有所表现，但影响的范围不大，对条播小麦一般仅2—4行。

参考文献

[1]、T.R.Oke, Boundary Layer Climates P99 London, 1978.

[2]NormanJ. Rosenberg, Microclimate: The Biological Environment. 232—234, 40—43, New York, 1974年.

[3]傅抱璞，农作物种植密度与小气候，地理学报，30(4)，1964.

[4]翁笃鸣等，套作农田小麦玉米共生期的通风透光条件分析，南京气象学院学报。1979，1。