

# 呼伦贝尔草原的太阳分光辐射能和光合潜力

田 国 良\*

(中国科学院遥感技术应用研究所)

在太阳辐射能中,紫外辐射具有较强的化学效应和生物学效应;可见辐射被绿色植物用来进行光合作用形成物质;红外辐射则具有重要的热学效应。在国民经济的不同领域里,往往不仅需要知道太阳辐射在全波段的能量,还需要进一步了解它的分光辐射特性。

我们于1975年5—6月,1976年4—7月,在内蒙古呼伦贝尔盟大兴安岭以北地区(简称呼盟岭北地区)进行了太阳直接辐射的分光测量。并根据该地区的大气浑浊度和地表反射率的实测资料,对天空散射的分光相对通量作了理论计算。根据测量和计算的结果,研究了该地区农作物生长季(5—8月)的紫外、可见和红外辐射的特征。并结合当地的农牧业生产,对该地区的光合潜力作了初步分析和评价。

太阳直接辐射的分光测量采用苏制 AT-50 型相对日射表。考虑了仪器的温度效应,对不同的电表温度取用了不同的仪器常数值<sup>[1]</sup>。日射表配有九种国产的锐截止型有色玻璃滤光片,可把太阳直接辐射分成10个波段。滤光片的透光性能,均用分光光度计逐个测定。滤光片型号及透光界限列于表1。

表1 有色玻璃滤光片的型号和透光界限

滤光片型号	JB <sub>2</sub>	JB <sub>3</sub>	JB <sub>6</sub>	CB <sub>3</sub>	CB <sub>5</sub>	HB <sub>10</sub>	HB <sub>11</sub>	HB <sub>16</sub>	HWB <sub>4</sub>
透光界限(毫微米)	400	434	472	523	574	608	630	700	980

在呼盟岭北地区选择了四个测点<sup>1)</sup>。每天都是在日周5°内无云的天气条件下,每隔一小时观测一次,清晨和傍晚每半小时测一次。两年共获得1,189组资料。

## 一、太阳直接辐射的分光测量结果及太阳散射辐射和总辐射的分光计算

太阳直接辐射的分光测量表明:四个测点的测量结果无明显差异,且在同一太阳高度下,尽管各波段  $\Delta\lambda$  内的分光辐射通量的瞬时值  $S_{\Delta\lambda}$  随着大气状况有变化,但它和全波

\* 参加本工作的还有周允华、项月琴、谢贤群、鲍士柱、单福芝等同志。

1) 四个测点为上库力 (E120°27', N50°15', 海拔高度  $h$  618 米),  
完工 (E118°53', N49°11',  $h$  607 米),  
巴克西 (E119°55', N49°19',  $h$  667 米),  
孟根楚鲁 (E119°48', N48°48',  $h$  654 米)。

段的直接辐射通量  $S$  之比值  $\eta_{\Delta\lambda} = S_{\Delta\lambda}/S$  却是相对稳定的。两年测得的各太阳高度下  $\eta_{\Delta\lambda}$  的平均值列于表 2。

表 2 呼盟岭北地区 4—7 月太阳直接辐射中分光辐射相对通量  $\eta_{\Delta\lambda}$  和太阳高度  $h_0$  的关系

颜色	$\eta_{\Delta\lambda}(\%)$ $h_0$ $\Delta\lambda$ (毫微米)	10°	15°	20°	30°	40°	50°	60°
紫外	<400	1.8	2.4	3.1	3.9	4.7	5.2	5.6
紫	400—434	3.3	3.8	4.2	4.5	4.9	5.2	5.5
蓝	434—472	2.7	3.2	3.6	4.2	4.7	4.9	5.1
青	472—523	4.9	5.5	5.9	6.4	6.4	6.5	6.5
绿	523—574	4.8	5.4	5.8	6.3	6.4	6.5	6.5
黄	574—608	3.9	4.0	4.1	4.3	4.6	4.8	5.0
橙	608—630	3.2	3.3	3.3	3.4	3.4	3.5	3.5
红	630—700	11.3	11.1	11.0	10.9	10.7	10.5	10.3
近红外	700—980	27.7	26.9	26.3	25.6	25.3	25.1	25.0
远红外	>980	36.4	34.4	32.7	30.5	28.9	27.8	27.0
全波段辐射通量 $S$ (卡/厘米 <sup>2</sup> ·分)		0.68	0.84	0.97	1.12	1.21	1.28	1.34

由表 2 可整理出各太阳高度下直接辐射中波长小于  $\lambda$  的辐射通量  $S_\lambda$  和全波段通量  $S$  之比值  $\eta_\lambda = S_\lambda/S$  和波长的关系, 从而得到  $\eta_\lambda$  随  $\lambda$  变化的连续曲线。这样可求得任一太阳高度下, 任一波段间隔  $\Delta\lambda$  内的相对通量值  $\eta_{\Delta\lambda} = S_{\Delta\lambda}/S = \eta_{\lambda_2} - \eta_{\lambda_1}$ 。

Deirmendjian 等人<sup>[2]</sup>曾根据 Raleigh-Chandrasekhan 的多次散射理论, 计算了 Raleigh 大气的天空散射辐射的光谱分布。计算时取了多种太阳高度, 地面反射率分别取了 0 和 0.25 两种值。Mecree 等<sup>[3]</sup>曾在晴朗无云的天气条件下, 分别对一个相当干洁的(大气浑浊度系数  $B = 0.02$ ) 和一个非常浑浊的 ( $B = 0.280$ ) 实际大气散射辐射的光谱成份作了测量。根据我们在呼盟岭北地区测量结果, 该地区的地面反射率平均为 0.19<sup>[4]</sup>, 作物生长季节的大气浑浊度系数平均为  $B = 0.05$ <sup>[5]</sup>, 这样可根据理论计算和实测资料, 使用内插方法计算出该地区在作物生长季节天空晴朗无云时候的散射辐射光谱分布, 绘出在各种太阳高度下波长小于  $\lambda$  的  $D_\lambda$  和全波段的通量  $D$  之比  $J_\lambda = D_\lambda/D$  和波长  $\lambda$  的关系曲线。由此可求得晴朗无云时任一太阳高度下, 天空散射辐射的相对通量  $J_{\Delta\lambda} = D_{\Delta\lambda}/D = J_{\lambda_2} - J_{\lambda_1}$ 。

水平面  $\Delta\lambda$  波段内分光辐射总通量  $Q_{\Delta\lambda}$  表达式为:

$$Q_{\Delta\lambda} = S'_{\Delta\lambda} + D_{\Delta\lambda} \quad (1)$$

式中  $S'_{\Delta\lambda}$  和  $D_{\Delta\lambda}$  分别为水平面上  $\Delta\lambda$  波段内的直接辐射和散射辐射通量。

当天空有云时, 我们可以近似的认为  $D_{\Delta\lambda}$  由两部分组成: 一部分是晴朗天空的散射  $D_{1\Delta\lambda}$ , 另一部分是云的散射  $D_{2\Delta\lambda}$ 。其中, 前一部分可以近似地采用晴朗无云的天空散射光谱的相对通量  $J_{\Delta\lambda}$ , 而后一部分因为是云滴的大颗粒散射, 对波长基本上无选择性, 因此它和入射来的直接辐射光谱成分差别不大<sup>[6]</sup>, 可以近似地取其光谱相对通量为  $\eta_{\Delta\lambda}$ 。这样, (1) 式可写成:

$$Q_{\Delta\lambda} = S'_{\Delta\lambda} + D_{1\Delta\lambda} + D_{2\Delta\lambda} = \eta_{\Delta\lambda}S' + (1 - n)J_{\Delta\lambda}D + n\eta_{\Delta\lambda}D \quad (2)$$

式中  $S'$  为水平面上全波段的直接辐射通量,  $n$  为总云量。(2) 式中的  $J_{\Delta\lambda}$  为计算值,  $\eta_{\Delta\lambda}$ ,

$S'$ 、 $D$  和  $n$  为实测值。

## 二、呼盟岭北地区农作物生长季的分光辐射特征

我们利用呼盟气象台(海拉尔)1975—1976年5—8月总辐射 $Q$ 和总云量 $n$ 的逐时观测资料,并根据左大康等<sup>[7]</sup>给出的 $S'/Q$ 与 $n$ 的关系,利用(2)式计算了呼盟岭北地区作物生长季各波段的 $S'_{\Delta\lambda}$ 、 $D_{\Delta\lambda}$ 和 $Q_{\Delta\lambda}$ 的值。8月份没有实测的分光资料,但是在该地区7—8月环流形势相同,都属雨季,整层大气水汽含量接近(7月比8月高10%),因此,把7月份的分光成分延用到8月份不会产生多大的误差。

图1和图2分别给出了紫外、可见和红外辐射三个波段在全波段中的相对通量值及相应波段的辐射通量值的平均日变化曲线。表3给出了整个作物生长季节各波段的辐射通量及其相对通量值。

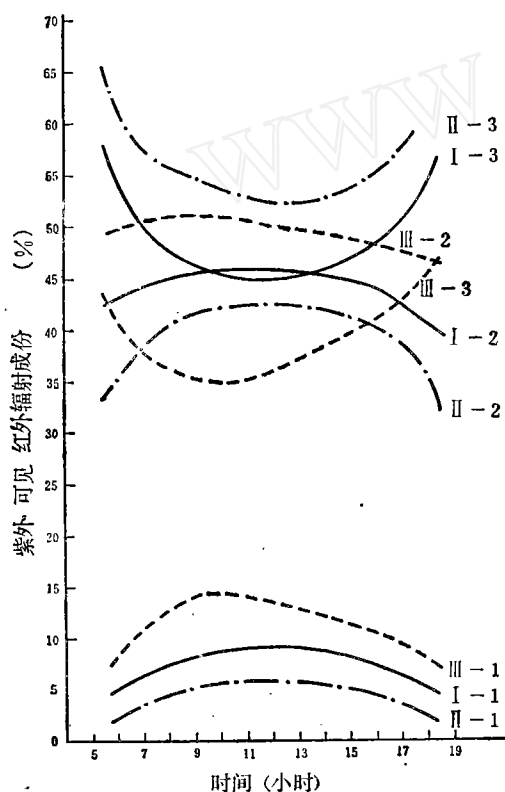


图1 呼盟岭北地区紫外、可见、红外辐射相对通量平均日变化曲线

(I、II、III 分别代表总辐射——,直接辐射——,散射辐射——; 1, 2, 3 分别代表紫外、可见、红外辐射)

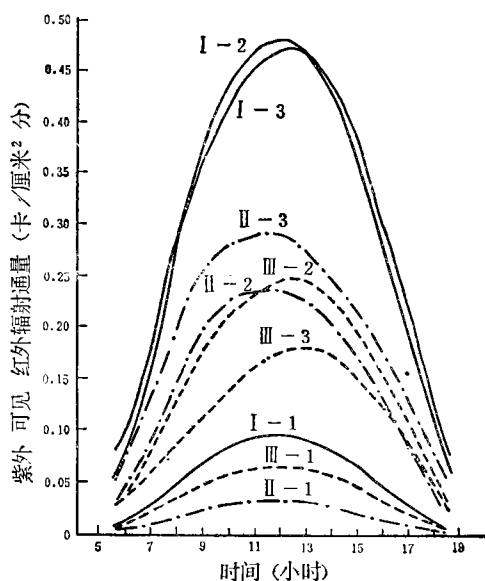


图2 呼盟岭北地区作物生长季紫外、可见、红外辐射通量的平均日变化曲线

(图例与图1相同)

从这些图和表中可以看到:

1. 紫外和可见辐射相对通量是早晚低、中午高。在散射辐射中,紫外和可见波段的相对通量比直接辐射中的高,而且峰值不在中午而在上午9—10时左右,这是因为中午以后云量增加的缘故。在直接辐射中,可见辐射相对通量在9—15时稳定在42%左右。

表 3 呼盟岭北地区作物生长季各波段水平面上的直接辐射、  
散射辐射和总辐射通量及其相对通量值

项 目 波 段 (毫微米)	直接辐射		散射辐射		总 辐 射	
	通量值 (千卡/厘米 <sup>2</sup> )	相对通量值 (%)	通量值 (千卡/厘米 <sup>2</sup> )	相对通量值 (%)	通量值 (千卡/厘米 <sup>2</sup> )	相对通量值 (%)
紫外辐射(<400)	1.78	5	3.85	12	5.63	8
可见辐射(400—700)	15.23	41	15.55	50	30.78	45
红外辐射(>700)	20.26	54	11.88	38	32.14	47
全波段辐射	37.27	100	31.28	100	68.55	100

2. 红外辐射波段的相对通量日变化和上述两个波段正相反。在直接辐射中, 它的值要比散射中的高得多(季节平均值各为 54% 和 38%)。由于云的影响, 散射辐射相对通量的最低值同样出现在 9—10 时左右。

3. 在总辐射中, 可见辐射和红外辐射的相对通量在 9—15 时几乎相同, 都稳定在 45%—46% 左右。但早晚差异则越来越大。

4. 在总辐射通量中, 紫外辐射通量主要来自散射辐射的贡献(约占 70%), 而在可见波段, 直接辐射和散射辐射的贡献差不多。由于下午云量增多, 上午直接辐射的贡献略大些, 而下午则是散射辐射贡献大些。在红外波段直接辐射的贡献超过了散射辐射, 占了 60% 以上(图 2)。

### 三、呼盟岭北地区光合有效辐射能量分析

许多研究表明<sup>[8,9]</sup>, 植物在光合作用过程中, 只同化太阳光谱中 400—700 毫微米区间的能量, 通常把它称为光合有效辐射, 它对植物的所有生活机能具有决定性的意义。在这个光谱段中植物吸收最多的是橙红光(595—700m $\mu$ )和紫蓝光(400—490m $\mu$ ), 而对绿黄光(490—595m $\mu$ )吸收最少。

采用和上节相同的方法计算的呼盟岭北地区作物生长季光合有效辐射中的紫蓝光、绿黄光和橙红光的总辐射通量平均日变化曲线示于图 3。

从图 2—3 可以看出, 该地区 5—8 月各波段的辐射通量日变化规律相似。在中午紫蓝光的最大值比绿黄光的最大值高 13% 左右。

在作物生长季该地区的光合有效辐射总量达到 30.80 千卡/厘米<sup>2</sup>, 占全波段的 45%。逐月的计算表明, 在生长季节, 逐月各波段相对通量值比较稳定, 月差异不大(见表 4)。

研究表明<sup>[9]</sup>, 植物正常生长发育所要求的光合有效辐射强度为 0.07—0.17 卡/厘米<sup>2</sup>·分。从图 2 的可见辐射通量日变化曲线可以看到, 在生长季节能满足这个要求的日照时间平均每天竟高达 11 个小时。

就光质而言, 5—8 月紫蓝光、橙红光和绿黄光日平均最大值分别为 0.17 卡/厘米<sup>2</sup>·分, 0.16 卡/厘米<sup>2</sup>·分, 0.15 卡/厘米<sup>2</sup>·分。每日 8—16 时, 上述三种光的强度都超过了 0.10 卡/厘米<sup>2</sup>·分(图 3)。因此它们均能满足一般绿色植物进行光合作用时对各种光质

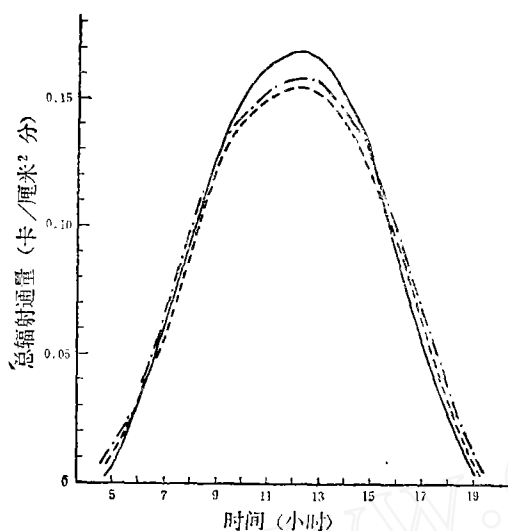


图3 呼盟岭北地区作物生长季紫蓝光、绿黄光和橙红光的总辐射通量平均日变化曲线  
(——为紫蓝光, - - - 为橙红光, ····为绿黄光)。

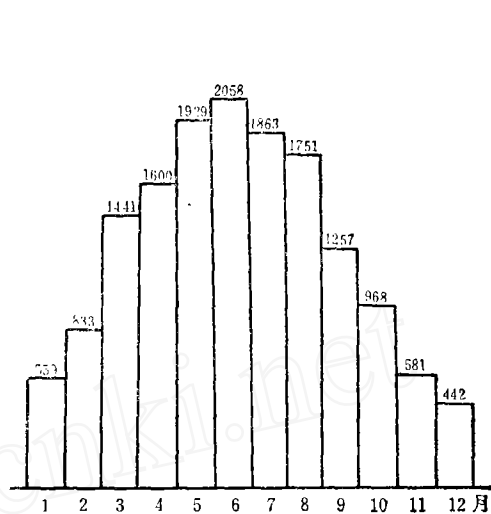


图4 呼盟岭北地区各月光合潜力  
(图上的数字为各月的光合潜力值: 斤/亩)

表4 呼盟岭北地区作物生长季各波段逐月总辐射通量值  
(千卡/厘米²)及其相对通量值(%)

月 份	波 段		紫外辐射		紫蓝辐射		绿黄辐射		橙红辐射		红外辐射		可见辐射	
	月总量及相对通量		月总量	相对通量	月总量	相对通量	月总量	相对通量	月总量	相对通量	月总量	相对通量	月总量	相对通量
5 月	1.40	8.2	2.62	15.4	2.48	14.5	2.59	15.1	7.99	46.8	7.69	45.0		
6 月	1.29	7.8	2.44	14.8	2.38	14.5	2.49	15.2	7.85	47.7	7.31	44.5		
7 月	1.54	8.4	2.78	15.3	2.69	14.8	2.73	15.0	8.45	46.5	8.20	45.1		
8 月	1.40	8.3	2.57	15.2	2.47	14.7	2.56	15.2	7.85	46.7	7.60	45.0		
5—8 月合计	5.63	8.2	10.41	15.2	10.02	14.6	10.37	15.1	32.14	46.9	30.80	44.9		

所需要的能量。

通过上述对光强和光质的分析可以看到: 在呼盟岭北地区作物生长季节里, 白天的大部分时间, 无论是光合有效辐射的强度, 还是各类光的强度都有利于作物的生长发育。

## 四、呼盟岭北地区的光合潜力

### (一) 光合潜力的估算

光合潜力是指在环境因素都处于最适宜状态时, 合理密植的高产作物在正常的二氧化碳浓度下通过光合作用所能产生的植物物质数量。我国科学工作者对于如何估算光合潜力有不少研究。本文采用黄秉维教授提出的一种比较简单的计算方法, 即把太阳总辐射通量  $Q$  (卡/厘米²·分) 乘上一个常数  $C$ , 就可以得到植物物质数  $M$  (斤/亩), 即  $M = CQ^0$ 。

1) 中国科学院地理研究所: 中国自然地理概论, 第十三章, 自然因素与作物生产(初稿), 1976, 5。

呼盟岭北地区的实测结果表明, 这里生长季的光合有效辐射占总辐射通量的比例平均为 45%。由此计算出的系数  $C = 0.1219$ 。图 4 给出该地区光合潜力的计算结果<sup>1)</sup>。这种估算光能利用率为 5.9%。

## (二) 呼盟岭北地区光合潜力的特点

呼盟岭北地处我国北部中高纬地区, 这里气候寒冷, 无霜期仅 110 天, 作物生长季一般为 5—8 月。由计算表明, 在 5—8 月的短短的 120 天中, 光合潜力却占全年的 49.7%, 即集中了全年的一半, 在这段时期内, 每日光照时间长达 14 个小时, 而且强度很高, 正午前后平均每小时光合潜力可达 7.3—7.8 斤/亩。5—8 月平均每天可使作物增加植物物质 67—73 斤/亩。因此, 该地区生长季节虽短, 但在这样短的时间内却集中了极为丰富的光能资源。若与全国其他地区相比, 更充分显示出这个特点(表 5)。

表 5 我国不同地区光合潜力与海拉尔的比较

地 区	年光合潜力斤/亩	5—8 月光合潜力斤/亩	5—8 月光合潜力占全年%	5—8 月光合潜力占海拉尔的%
海拉尔	15,282	7,601	49.7	100.0
汉 口	13,835	6,391	46.2	84.1
广 州	14,050	5,631	40.1	74.1
上 海	13,612	6,005	44.1	79.0
成 都	11,278	5,267	46.7	69.3
北 京	16,438	7,329	44.6	96.4
拉 萨	22,367	9,124	40.8	120.0
格尔木	20,603	8,848	42.9	116.4

在作物生长季中, 光、热、水条件的配合也很好。该地区日平均气温稳定通过 10℃ 的日期是从 5 月 23 日起到 9 月 10 日止, 约 120 天, 正值春小麦迅速生长期。一般中熟品种, 从播种到成熟所需时间为 105—125 天。该地区 5 月 1 日左右开始播种到 8 月底成熟。5 月上旬平均气温为 6.9℃, 满足播种时需要的温度。5 月 20 日左右小麦出苗, 这时有一部分光能尚未充分利用。6 月平均气温为 17.2℃, 正是春小麦进入光合作用最适宜的温度时期, 小麦的叶面积系数增长很快, 正好能充分利用此时的最高光合潜力。7 月 10 日左右小麦开始抽穗, 平均气温上升到 19.4℃, 降水量月平均达 90.8 毫米, 月光合潜力为 1,863 斤/亩, 8 月平均气温 17.1℃, 降水量 84.1 毫米, 光合潜力 1,751 斤/亩, 这样的条件能满足小麦开花的需要, 保证从抽穗到成熟期的足够时间, 利于春小麦大穗的形成<sup>[10]</sup>。加之该地区气温日较差大(5—8 月平均为 12.4℃), 有利于籽实的积累。

通过对呼盟岭北地区作物生长季节的水热和光能条件的综合分析, 我们认为这里虽然生长季很短, 但仍然具备了农业丰产的自然条件。

## (三) 呼盟岭北地区的生产潜力

由图 4 可知, 呼盟岭北地区光合潜力全年为 15,282 斤/亩。在主要农作物及牧草生长期的 5—8 月, 光合潜力为 7,601 斤/亩。就春小麦而言, 苗期叶面积系数很小, 成熟期叶片衰老, 光合作用弱, 只能利用光能的一部分。如果取利用率的 2/3, 再考虑到春小麦籽实占植物物质的 35%, 则每亩可产小麦 1,770 斤左右。地处海拔三千米左右的高寒荒漠

1) 所用总辐射资料取用海拉尔气象台 1970—1976 年资料, 下文引用的其他资料为该台的 10—20 年的平均资料。

灌区的青海德令哈农场,春小麦亩产可超千斤。而呼盟岭北地区与德令哈农场条件差不多,5—8 月的光合潜力比德令哈农场(用格尔木代替)略低些。由此推知,若能充分利用这些光能资源是可能获得粮食高产的。

目前呼盟岭北地区春小麦亩产只 200 斤左右,光能利用率仅达 0.7%。这表明光能资源未得到充分利用,粮食生产有巨大的潜力。

特别值得提出的是,该地区是我国主要牧区之一,如果按前述方法计算该地区牧草长期的光合潜力为 8,670 斤/亩,牧草的产量为 4,000 斤/亩左右。理论载畜量为现有牲畜数的 23 倍。按现有牲畜数计算,光能利用率仅达 0.23%。国外牧草光能利用率最高记录已达到 7.7%。由此看出,目前该地区草场的光能利用率极低,牧业生产发展潜力很大。

光合潜力是在环境因素最适宜的条件下计算出来的。事实上,作物在整个生长期,并不是所有的环境因素都适宜于它的生长,这里的春旱、风沙、低温、早霜等自然灾害往往限制了光合潜力的充分发挥,目前光能利用率很低,生产潜力远没有充分发挥出来。因此,如何战胜春旱、风沙、低温、早霜等自然灾害,提高光能利用率,向阳光要更多的粮食和牧草是实现农牧业现代化所要解决的重要课题。

## 五、结 语

1. 太阳辐射的分光成分要受到大气状况(主要是空气湿度和大气浑浊度)以及云的影响。本文仅讨论了呼盟岭北地区在作物生长季节里的分光辐射能状况,至于其他季节或其他地区,在数值上显然会有一定的差异。但我们相信,分光辐射的某些基本特性,对我国其他地区,特别是对我国北部的干旱、半干旱地区应该具有普遍的意义。

2. 无论对呼盟岭北地区的光合有效辐射能的分析,还是对该地区光合潜力的估算,都充分表明,该地区的光能资源是很丰富的。尽管该地区气候严寒,无霜期很短,往往被人们认为这里的气候条件对作物生长不利。但是由于该地区的光照强度大,大部分又集中在水分和热量条件适宜于作物生长的 5—8 月,这段时间里日照时间长,加上该地区地处高原,温度日较差大,雨量集中在夏季,这些特点就使作物有可能在短短的 120 天的生长季节里充分利用良好的水热条件和丰富的光能资源。因此我们认为,对这一类地区,关键在于能培育出一种耐旱早熟的品种,就有可能使这类地区的粮食产量获得大幅度的增加。

## 参 考 文 献

- [1] 周允华,鲍士柱,单福芝:热电式相对日射表温度效应的测量,气象, (2), 1978。
- [2] D. Deirmendjan et al: Global Radiation Resulting from multiple Scattering in a Rayleigh Atmosphere, Tellus, Vol. 6, No. 4, 1954.
- [3] K. J. Mccree et al: Effect of atmospheric turbidity on the photosynthetic rates of leaves. Agricultural Meteorology, Vol. 13, No. 3, 1974.
- [4] 谢贤群,鲍士柱:海拉尔东部开垦地和草场地表热量平衡及其对尘埃输送的影响,地理学报, 33(2), 1978。
- [5] 周允华,项月琴,谢贤群:呼伦贝尔草原大气浑浊度的测量和尘埃输送的初步探讨,大气科学, 2(4), 1978。
- [6] K. Я. 康德拉捷夫:太阳辐射能, p. 388, 科学出版社, 1962 年。
- [7] 左大康等:中国太阳直接辐射,散射辐射和太阳总辐射间的关系,地理学报, 28(3), 1962。
- [8] 云南大学生物系生态地植物学组:植物生态与植物群落基本知识,科学出版社, 1976。
- [9] A. Ф. 克列什宁:植物与光,科学出版社, 1963 年。
- [10] 农业部农垦局编:国营农场农业技术手册,上海人民出版社, 1975 年。