

生产者亚系统

高寒草甸生态系统微气候和植物的生理生态反应\*

I. 定位站地区太阳辐射特征及植物冠层对辐射吸收的分析

黄桂英 韩发 师生波 卢存福\*\*

(中国科学院西北高原生物研究所)

摘 要

1987—1989 年在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站地区植物生长季节,对太阳辐射特征及矮嵩草 (Kobresia humilis) 草甸植物冠层对太阳辐射的反射、吸收等动态规律进行了研究。太阳总辐射和光合有效辐射均以 6 月最强,其最大值通量密度分别为 1 142.0 W m^-2 及 2 240.0 μmol 量子 m^-2 s^-1。光合有效辐射与总辐射的比值为 0.41 ± 0.06; 直接辐射强,占总辐射的 60—70%。6—8 月间,矮嵩草草甸半封育草场植物冠层光合有效辐射的反射系数在 0.04—0.09 之间;总辐射反射系数为 0.24 ± 0.03。反射系数的季节变化与植物群落生长发育状况密切相关。植物生长盛期中午前后,冠层对光合有效辐射的消光系数为 0.45 ± 0.03。生长期内植物群落地上部分光合有效辐射的光能利用率为 0.65% 左右。

关键词: 高寒草甸; 生态系统; 微气候; 太阳辐射; 反射率; 光能利用率。

在生态系统中,非生命环境亚系统的微气候通过对植物生理生化过程的直接或间接作用,进而影响植物的生产力。因之,在自然条件下测定微气候特征,分析植物对各种

\* 中国科学院择优支持及海北高寒草甸生态系统定位站基金资助项目。

\*\* 在学硕士生。

微气候因子的生理生态反应,是生态系统中主要研究内容之一。

1987—1989年,我们于植物生长季节,在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站地区(北纬 $37^{\circ}29'$ — $37^{\circ}45'$ ,东经 $101^{\circ}12'$ — $101^{\circ}33'$ ;海拔3200m),对太阳辐射特征,植物及环境的温度变化,水分蒸腾及气孔行为,植物群落及个体光合作用等进行了系统地观测,其研究结果将陆续予以报道。

本文主要报道定位站地区的太阳总辐射(global radiation)、直接辐射、光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)等的动态特征,并分析矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸植物群落冠层对太阳辐射的反射、透射及吸收动态,为进一步研究生产者亚系统提供参数。

## 观测样地及方法

本项研究的观测样地设在矮嵩草草甸的半封育草场,地势开阔平坦,其植被以矮嵩草为优势种。研究时期为植物生长季节(5—9月)。所有辐射参数的测定均在晴朗无云的条件下进行。观测从日出至日落,每隔1—2时逐一记载各项参数。如遇阴雨天气,则顺延。主要观测仪器为LI-188B量子/辐射·光度计,使用LI-190SB及LI-200SB等不同传感器测定各项辐射参数;采用LI-3000型面积仪测定叶面积。

有关辐射参数的计算公式分别为:

太阳高度角(solar elevation angle,  $h^{\circ}$ )按Campbell(1981)的公式计算,

$$h^{\circ} = \arcsin[\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos 15(t_a - t_{sn})]$$

式中, $\delta$ 为太阳倾角(度),可查表得知; $\phi$ 为所在地区地理纬度(度); $t_a$ 为测定时一天中的时间(北京时), $t_{sn}$ 为太阳正午(solar noon)时间。

太阳短波辐射分为直接辐射和散射辐射。达到地表水平面上的总辐射通量密度( $S_t$ )以下式(Coulson, 1975)表示,

$$S_t = S_b + S_d$$

$$S_b = S_p \sin h^{\circ}$$

其中 $S_b$ 为直接辐射, $S_d$ 为散射辐射, $S_p$ 为垂直于光线平面上的直接辐射。

植物群落冠层对日辐射的反射,即一个向下的水平面接收来自下表面的辐射 $S_r$ ,以List(1971)的公式计算,

$$S_r = \bar{\rho} S_t$$

其中, $\bar{\rho}$ 为反照率(albedo)或反射系数, $S_t$ 为水平表面的辐射通量。

投射到植物群落冠层中的辐射通量,一般随冠层深度的增加呈指数下降,即遵循Lambert-Beer消光定律。若将群落冠层视为均一的,则在冠层中辐射的消减可按Monsi和Saeki(1953)的消光方程计算,

$$R_i = R_0 e^{-K_{exi} \cdot L}$$

对上式取对数并加以整理得,

$$K_{exi} = \frac{\ln(R_0/R_i)}{L}$$

式中, $K_{exi}$ 为消光系数; $R_0$ 为冠层上方的辐射通量( $W m^{-2}$ ); $R_i$ 为冠层中某层的辐射; $L$ 为辐射 $R_i$ 水平上的绿色面积指数; $e$ 为自然对数底。

## 结果与讨论

### (一) 太阳短波辐射状况

太阳短波辐射是指波长在  $0.3-3.0\mu\text{m}$ , 来自太阳半球的辐射。在地面测定的太阳辐射通量密度主要取决于太阳高度角 ( $h^\circ$ ) 和云量, 并受海拔高度和大气透明度的影响。

1. 太阳高度角和日照长度 晴天, 在植物群落冠层上方辐射通量密度的日变化和季节变化基本上是太阳高度角的变化所致。另外, 冠层对辐射的反射、透射及消光系数均与太阳高度角有关。太阳高度角越大, 太阳光束射程越短, 辐射被大气吸收、散射和反射的量也越少。海北定位站地区太阳高度角的变化如图 1 所示。6 月 21 日(夏至)太阳高度角最大, 中午 13 时高度角达  $75.45^\circ$ 。7 月高度角与 6 月接近; 9 月高度角明显降低, 12 月降至全年最低水平。叶菲莫娃 (1977) 指出, 随太阳高度角的增加, 紫外辐射和可见光成分增加, 高度角越小, 红外辐射成分越多。

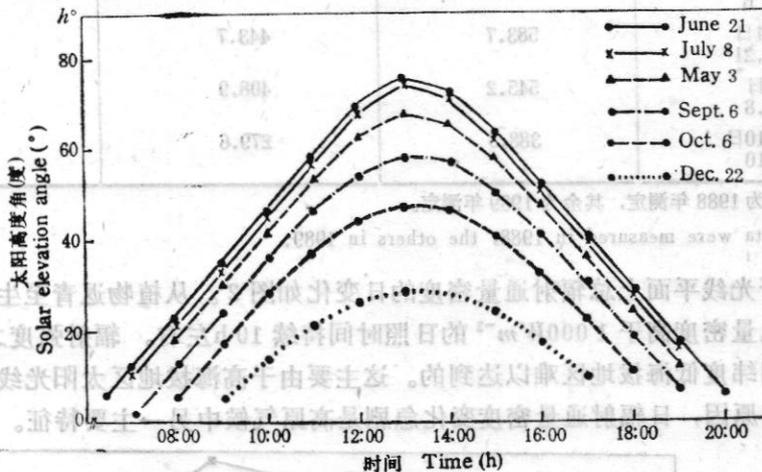


图 1 海北定位站地区太阳高度角(度)的日变化和季节变化

Fig.1 Diurnal and seasonal changes of solar elevation angle(degree)in Haibei Research Station region.

本站位于高海拔的中高纬度地区, 在植物生长季节白天长于黑夜(表 1)。4 月下旬至 6 月下旬日照时间长于 13h。此时正处于植物的返青期, 6 月下旬和 7 月份植物生长速率迅速增加, 较长的日照时间和较强的日辐射对植物的前期生长发育十分有利, 并为群落的干物质生产打下基础。

表 1 海北定位站地区植物生长季节日照长度 (h)

Table 1 The day length (h) during the growing season in Haibei Research Station region.

日期 Date	4月28日 April 28	5月3日 May 3	5月30日 May 30	6月6日 June 6	7月13日 July 13	8月21日 Aug.21	9月8日 Sept.8
日出-日落 Sunrise-sunset	07:55-20:50	07:55-21:00	07:50-21:15	08:00-21:15	08:00-20:50	08:00-20:50	08:10-20:40
日长 Day length (h·min)	12.55	13.05	13.25	13.15	12.50	12.50	12.30

2. 太阳总辐射和直接辐射 该地区植物生长季节晴天 (full sunlight) 时总辐射通量密度及其最大值列于表 2。以 6 月总辐射最强。我们未观测到日总辐射达到或超过太阳常数 ( $S = 1367.7 W m^{-2}$ ) 的现象, 但于 6 月 6 日测到垂直于光线平面上总辐射通量密度最大值为  $1240.0 W m^{-2}$ , 若将此值与太阳常数比较, 则有 80.5% 的日辐射通过大气层达到地面。

表 2 定位站地区太阳总辐射及其极值

Table 2 Solar global radiation and maximum values in Haibei Research Station region.

日期 Date	日平均 Daily average ( $W m^{-2}$ )	日总量 Daily totals ( $kJ m^{-2} \cdot d^{-1}$ )	极值 Maximum values ( $W m^{-2}$ )
4月28日 April 28	533.9	448.5	1040.1
5月3日 May 3	608.1	513.7	1060.0
5月30日 May 30*	627.1	542.6	1142.0
6月6日 June 6	634.6	549.1	1128.0
8月21日 Aug. 21*	583.7	443.7	1083.0
9月8日 Sept. 8	545.2	408.9	1010.0
10月10日 Oct. 10	388.3	279.6	768.0

\* 此数据为 1988 年测定, 其余为 1989 年测定。

The data were measured in 1988, the others in 1989.

垂直于光线平面上总辐射通量密度的日变化如图 2。从植物返青至生长盛期末, 一天中辐射通量密度高于  $1000 W m^{-2}$  的日照时间持续 10 h 左右。辐射强度之大, 持续时间之长是同纬度低海拔地区难以达到的。这主要由于高海拔地区太阳光线光程较短, 空气洁净等原因, 日辐射通量密度变化急剧是高原气候中另一主要特征。从图 2 看出,

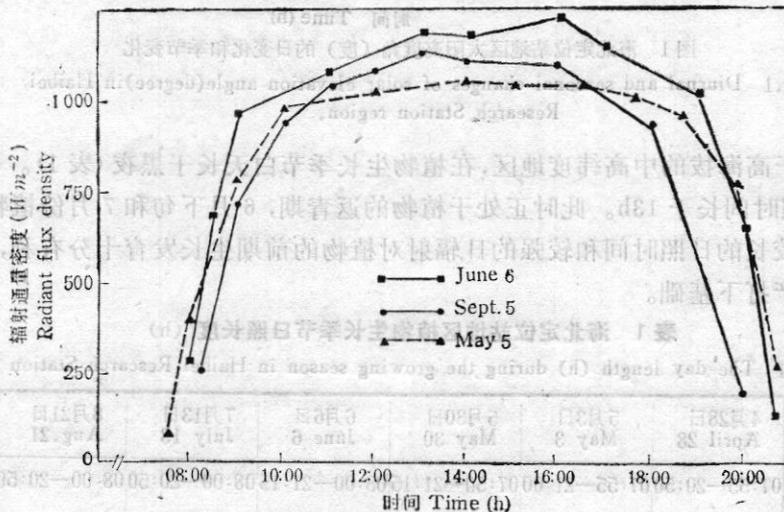


图 2 植物冠层表面垂直于光线平面上太阳总辐射

Fig. 2 Solar global radiation on plant canopy surface on perpendicular plane to the solar beam.

日出1h左右, 通量密度即可接近  $1000W m^{-2}$ , 日落前1h开始急骤下降。

水平面上太阳直接辐射如图3。辐射通量密度的日变化曲线呈 $\Omega$ 型。5月上旬至9月上旬正午前后通量密度平均值为  $997.2W m^{-2}$ 。其中6月最大。直接辐射的最大值为  $1169.8W m^{-2}$ , 低于拉萨的  $1221.21W m^{-2}$ , 而与代加洗等(1977)在格尔木地区测得的值 ( $1172.37W m^{-2}$ ) 相近。

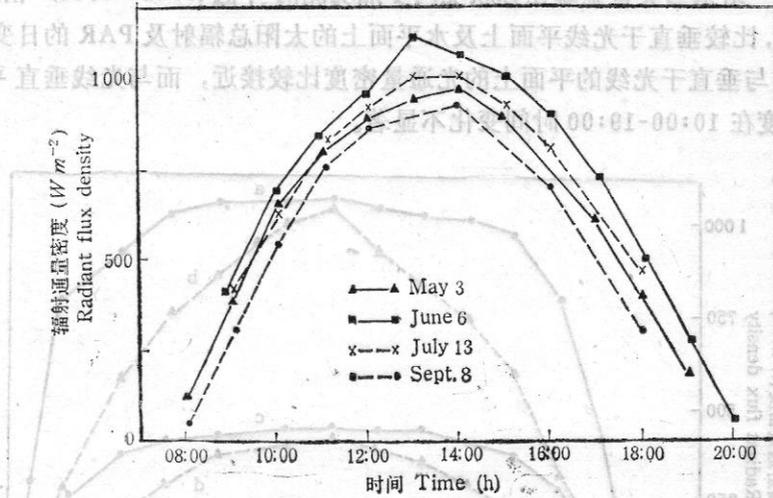


图3 生长季节植物冠层表面太阳直接辐射日变化

Fig.3 Diurnal changes of the direct radiation on plant canopy surface during the growing season.

直接辐射占太阳总辐射的比例大是高原地区太阳辐射的重要特征之一(袁福茂, 1985)。海北定位站地区, 直接辐射占总辐射的60—70%, 散射辐射占40%以下。

3. 光合有效辐射 光合有效辐射 (PAR) 是指波长在  $0.4-0.7\mu m$  范围内, 由植物光合作用所吸收的辐射。在本项研究中, PAR 通量密度采用 LI-188B 辐射仪 190SB 量

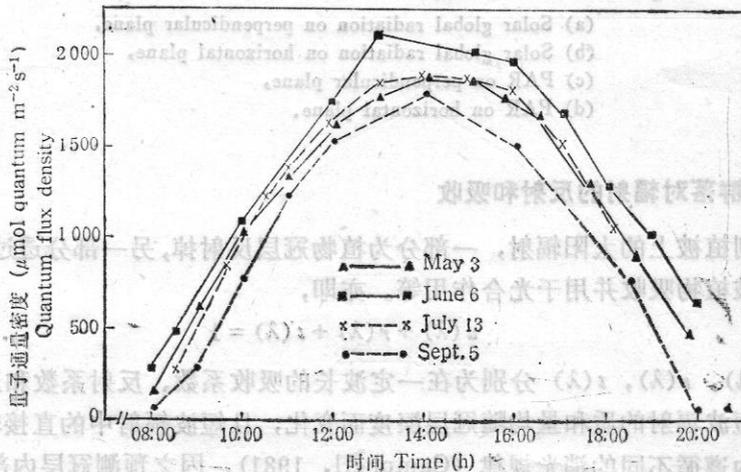


图4 生长季节冠层表面光合有效辐射日变化

Fig.4 Diurnal changes of PAR on canopy surface during the growing season.

子传感器测定,并以量子通量密度 (quantum flux density) 为单位,在计算 PAR 日总辐射量时以  $\text{kJm}^{-2}\text{d}^{-1}$  表示。

生长季节植物冠层上方光合有效辐射日变化及季节变化如图4所示。同样以6月PAR通量密度最大。瞬时极值达  $2240\mu\text{mol 量子m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 日总量为  $233.46\text{kJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。

光合有效辐射与总辐射的比例系数  $\eta$  值为  $0.41 \pm 0.06$ , 它随季节和一天中不同时间变化较小。这一结果与奥霍金娜在苏联境内多点观测的  $\eta$  值 (0.41—0.44) 相近。

在一天中,比较垂直于光线平面上及水平面上的太阳总辐射及 PAR 的日变化 (图5), 中午水平面上与垂直于光线的平面上的光通量密度比较接近, 而与光线垂直平面上的 PAR 通量密度在 10:00—19:00 时间变化不显著。

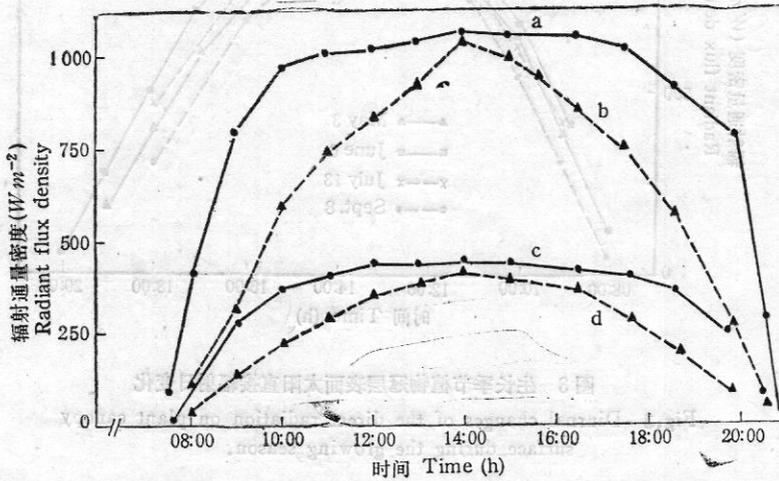


图5 冠层上方垂直于光线平面上和水平面上太阳总辐射与光合有效辐射比较

- (a) 垂直于光线平面上的总辐射; (b) 水平面上总辐射;  
(c) 垂直于光线平面上 PAR; (d) 水平面上 PAR。

Fig.5 Comparisons for the diurnal change of the solar global radiation and PAR on canopy top on horizontal plane and perpendicular plane to the beam (on August 8, 1989, clear day).

- (a) Solar global radiation on perpendicular plane,  
(b) Solar global radiation on horizontal plane,  
(c) PAR on perpendicular plane,  
(d) PAR on horizontal plane.

## (二) 植物群落对辐射的反射和吸收

投射到植被上的太阳辐射,一部分为植物冠层反射掉,另一部分透过冠层达到地面,其余部分被植物吸收并用于光合作用等。亦即,

$$a(\lambda) + r(\lambda) + t(\lambda) = 1$$

式中,  $a(\lambda)$ ,  $r(\lambda)$ ,  $t(\lambda)$  分别为在一定波长的吸收系数、反射系数和透射系数。

由于短波辐射的质和量均随冠层深度而变化,且短波辐射中的直接辐射和散射在不同的冠层内遵循不同的消光规律 (Campbell, 1981), 因之预测冠层内部辐射环境的变化是极为困难的。本文仅就整个冠层对日辐射的反射、消光及透光率进行分析。

1. 冠层反射 在评述植物群落对辐射能的吸收和利用程度时,必须考虑植物冠层

反射性能,它与植物冠层结构及太阳高度角有关。反射是在冠层上方 60cm 高水平面上测定。中国科学院海北定位站地区矮蒿草甸,8 月上旬和 9 月上旬冠层的 PAR 反射率日变化过程如图 6、图 7 所示。早、晚时刻反射系数  $\bar{\rho}$  值上升,中午低平。当早、晚太阳高度角小时,太阳光线很少透射到冠层内部,绝大部分光线被冠层反射掉。此外,太阳高度角小时,太阳辐射通量中的红外辐射增加,其辐射较易被植物冠层反射。6 月至 8 月下旬 10:00—18:00 时之间 PAR 的反射系数在 0.03—0.08 之间。

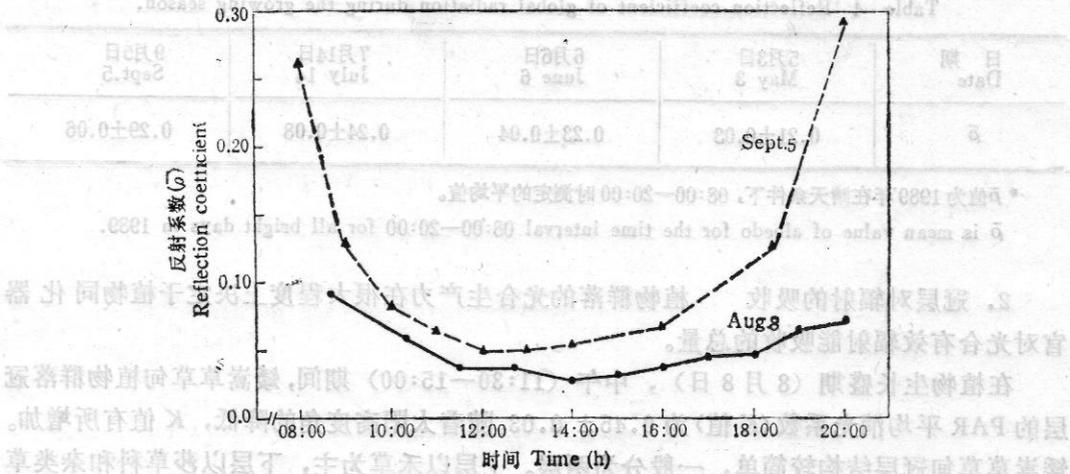


图 6 冠层表面光合有效辐射反射系数的日变化

Fig.6 Diurnal change of canopy surface reflection coefficient of PAR.

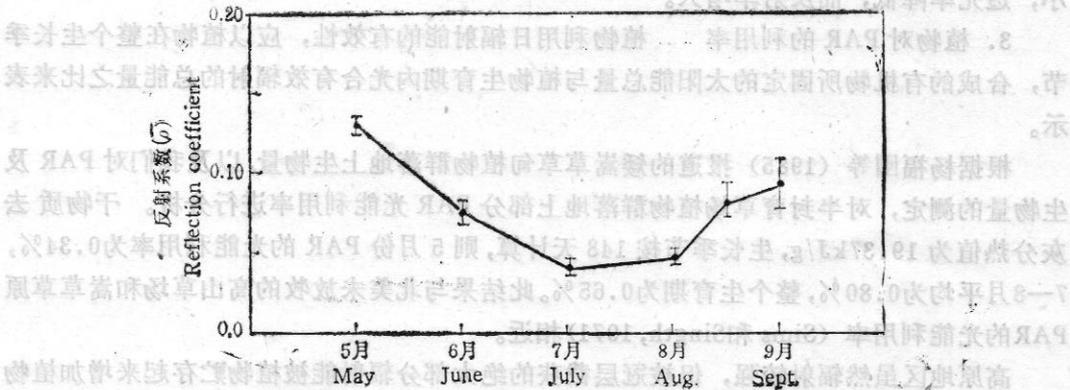


图 7 冠层表面光合有效辐射反射系数的月变化(数据为 08:00—20:00 时间内平均值)

Fig.7 Monthly change of canopy surface reflection coefficient of PAR  
(mean values for the time interval 08:00 to 20:00 in bright days).

反射系数的月变化与植物群落的发育、植物器官的光学性质及植物群落结构有关。从图 7 看出,5 月上旬植物处于返青初期,植被郁闭度小,绿色部分投影面积指数仅为 0.22 左右,反射率受地表影响较大,反射系数较高 ( $0.14 \pm 0.03$ ); 7、8 月份植被茂密,郁闭度大,绿色面积指数达到 2.0 左右,整个植被呈绿色,反射率降低,日平均反射系

数在 0.04—0.09 之间。在此期间植物干物质生产最旺盛, 植被对辐射能的吸收增加。8 月下旬和 9 月, 气温逐渐下降, 植被枝叶开始枯黄, 植被反射系数增加, 尤其早、晚更加显著,  $\bar{\rho}$  值达 0.29。冠层总辐射反射系数, 较光合有效辐射大得多(表 4), 植物生长季节平均为 0.24 ± 0.03, 此结果与季国良(1985), 代加洗等(1977)在青藏高原其它地区观测的结果相近。

表 4 生长季节冠层的总辐射反射系数  $\bar{\rho}$

Table 4 Reflection coefficient of global radiation during the growing season.

日期 Date	5月3日 May 3	6月6日 June 6	7月14日 July 14	9月5日 Sept.5
$\bar{\rho}$	0.21±0.03	0.23±0.04	0.24±0.08	0.29±0.06

\*  $\bar{\rho}$  值为 1989 年在晴天条件下, 08:00—20:00 时测定的平均值。

$\bar{\rho}$  is mean value of albedo for the time interval 08:00—20:00 for all bright days in 1989.

2. 冠层对辐射的吸收 植物群落的光合生产力在很大程度上决定于植物同化器官对光合有效辐射能吸收的总量。

在植物生长盛期(8月8日), 中午(11:30—15:00)期间, 矮嵩草草甸植物群落冠层的 PAR 平均消光系数(K 值)为 0.45 ± 0.03。随着太阳高度角的降低, K 值有所增加。矮嵩草草甸冠层结构较简单, 一般分为两层。上层以禾草为主, 下层以莎草科和杂类草植物为主。8月绿色面积指数为 2.64, 其中约 67% 集中于 10cm 以下。对辐射能的吸收也主要集中于冠层的中下部。

群落的透光率在中午前后达最大值, 8月上旬在 28—34% 之间。随着太阳高度角减小, 透光率降低, 而反射率增大。

3. 植物对 PAR 的利用率 植物利用日辐射能的有效性, 应以植物在整个生长季节, 合成的有机物所固定的太阳能总量与植物生育期内光合有效辐射的总能量之比来表示。

根据杨福圃等(1985)报道的矮嵩草草甸植物群落地上生物量, 以及我们对 PAR 及生物量的测定, 对半封育草场植物群落地上部分 PAR 光能利用率进行分析。干物质去灰分热值为 19.37kJ/g, 生长季节按 148 天计算, 则 5 月份 PAR 的光能利用率为 0.34%, 7—8 月平均为 0.80%, 整个生育期为 0.65%。此结果与北美未放牧的高山草场和嵩草草原 PAR 的光能利用率(Sims 和 Singth, 1971)相近。

高原地区虽然辐射较强, 但被冠层截获的绝大部分辐射能被植物贮存起来增加植物体温度, 用于热量交换, 而光合作用所固定的太阳能在总能量流通中是微乎其微的。

### 参 考 文 献

- 代加洗、李鹏杰、苏宏德, 1977, 唐古拉地区辐射状况和冷热源的探讨, 青藏高原气象论文集, 科学出版社, 176—193。
- 叶菲莫娃, H.A., 1977, 植被产量的辐射因子(王炳忠译), 气象出版社, 5—101。
- 季国良, 1985, 1982年8月—1983年7月青藏高原地区的辐射与气候, 高原气象, 4(4): 10—9。
- 杨福圃、陆国泉、史顺海, 1985, 高寒矮嵩草草甸结构特征及其生产量, 高原生物学集刊, 4: 49—56。
- 袁福茂, 1985, 青藏高原改则地区的辐射特征, 高原气象, 4(4): 36—49。
- Campbell, G.S., 1981, Fundamentals of radiation and temperature relations, pp. 11—18, in Physiolo-

- gical plant ecology I (O.L.Lange, P.S.Nobel, C.C.Osmond, H.Ziegler, eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 625.
- Coulson, K.L., 1975, Solar and terrestrial radiation, Academic Press, New York.
- List, R.I., 1971, Smithsonian meteorological tables, Smithsonian Institution Press, Washington, D.C.
- Monsi, M. and T. Saeki, 1953, Üden den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion, *Jap. J. Bot.*, 14:22—52.
- Smis, P.L., J.S. Singh, 1971, Herbage dynamics and net primary production in certain ungrazed grasslands in North America. 59—124. in Preliminary analysis of structure and function in grasslands (N.R.French, ed.), Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

## MICROCLIMATE AND PLANT PHYSIOECOLOGICAL RESPONSES IN ALPINE MEADOW ECOSYSTEM

### I. CHARACTERISTICS OF THE SOLAR RADIATION IN THE REGION OF HAIBEI RESEARCH STATION AND AN ANALYSIS FOR THE RADIATION ABSORPTION OF PLANT CANOPY

Ben Guiying, Han Fa, Shi Shengbo and Lu Cunfu  
(Northwest Plateau Institute of Biology, The Chinese Academy of Sciences)

The major objectives of the series of articles are to analyse on the microclimate in the region of Haibei Research Station of Alpine Meadow Ecosystem (37°29'—37°45'N., 101°12'—101°33'E.; El. 3 200m) and to discuss physioecological responses of plant adapted to these environments. For the further study we attempt to explain community pattern and plant production.

The characteristics for the solar radiation were analysed by using the data that obtained in *Kobresia humilis* meadow during the growing season in 1987—1989. Microclimate and solar radiation profiles were measured for the time interval from sunrise to sunset on bright days. The results are as follows;

The photoperiod during much of the growing season averaged 13—14h, and the days were sunshine. Maximum of the global radiation was  $1142.0 \text{ Wm}^{-2}$ , maximum PAR was  $2240.0 \mu\text{mol quanta m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , which reached a plane that was perpendicular to solar beam. The highest radiation appeared in June, it was significant that community assimilation rate was the highest [ $3.44 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ] for the same period. Diurnal and seasonal variations precipitately of solar radiation were marked features at high elevation region. The radiant flux density which was perpendicular to solar beam steeply increased and reached  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  after sunrise for 1 h; before sunset 1 h it dropped sharply to the lowest. The radiation flux density above  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  continued about 10 h in the day. Direct radiation was main portion of components in solar global radiation, it was 60—72% and

very strong, since the turbid scattering and atmosphere absorbing were less on plateau than on low-land. For the same reason the diffuse radiation was lower in the region. Maximum value of direct radiation was  $1\,169.8\text{ W m}^{-2}$  for the time interval 12:00—15:00 on May 30, 1989.

Photosynthetically active radiation (PAR) maximum was  $2\,310\ \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . The ratio of the energy in PAR to global radiation was 0.41, and it was nearly independent of the season. The mean albedo of PAR on vegetation surface of *Kobresia humilis* meadow was  $0.05 \pm 0.01$ , albedo of global radiation was  $0.24 \pm 0.05$  in July and August. It was evident that albedo was related to the solar elevation angle. When elevation angle getting lower, the albedos increased. Mean extinction coefficient of canopy for PAR was  $0.45 \pm 0.03$  in the middle days (11:30—15:00) on August 8, it increased slightly with the decrease of solar elevation angle. The conversion efficiency of PAR energy captured in net primary production of aboveground was 0.65%, and in comparison with the considerable incident radiation, the value above was extremely meagre.

**Key words:** Alpine meadow; Ecosystem; Microclimate; Solar radiation; Reflection coefficient; Efficiency of radiation utilization.

The major objectives of the series of articles are to analyse on the microclimate in the region of Hailu Research Station of Alpine Meadow Ecosystem ( $37^{\circ}29'N$ ,  $101^{\circ}12'N$ ,  $101^{\circ}12'N$ — $101^{\circ}33'E$ , E1: 3200m) and to discuss physiological responses of plant adapted to these environments. For the further study we attempt to explain community pattern and plant production.

The characteristics for the solar radiation were analysed by using the data that obtained in *Kobresia humilis* meadow during the growing season in 1987—1989. Microclimate and solar radiation profiles were measured for the time interval from sunrise to sunset on bright days. The results are as follows.

The photoperiod during much of the growing season averaged 13—14h, and the days were sunnier. Maximum of the global radiation was  $1\,148.0\text{ W m}^{-2}$ , maximum PAR was  $2\,310.0\ \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , which reached a plane that was perpendicular to solar beam. The highest radiation appeared in June, it was significant that community assimilation rate was the highest  $3.41\text{ g}(\text{C m}^{-2}\text{d})^{-1}$  for the same period. Diurnal and seasonal variations precipitately of solar radiation were marked features at high elevation region. The radiant flux density which was perpendicular to solar beam steeply increased and reached  $1\,000\text{ W m}^{-2}$  after sunrise for 1 h before sunset. It dropped sharply to the lowest. The radiation flux density above  $1\,000\text{ W m}^{-2}$  continued about 10 h in the day. Direct radiation was main portion of components in solar global radiation, it was 60—72% and