

文章编号: 1007-0435(2002)01-0033-07

# 海北高寒草甸地区太阳总辐射 植被反射辐射的有关特征\*

李英年, 赵新全, 曹广民, 师生波

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

**摘要:** 祁连山海北高寒草甸地区, 有较强的太阳总辐射及地表反射辐射。通过 2000 年观测结果表明, 在植物生长期的 4~10 月, 太阳总辐射和地表反射辐射总量分别达  $4227.049 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $973.556 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。二者有明显的日变化规律, 瞬时最高值出现于北京时间 13~14h 左右, 日瞬时最大值分别可达  $1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $220 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  以上。植物生长期间太阳总辐射变化受太阳高度角及其当地气候环境的影响, 太阳高度角高或气候干燥时太阳总辐射值大, 而地表反射辐射依太阳总辐射的变化而变化, 二者均在 7 月最高, 5 月次高。植物生长后期, 气候湿润, 太阳总辐射和地表反射辐射均较低。地表反射率不论在日间还是植物生长的季节间, 均表现一“U”型变化过程, 其中日间在中午前后最低, 最低可达 0.19, 季节变化以 6~7 月最低, 约为 0.21, 当然受土壤潮湿程度及地表性质等影响, 其它时间也可降到 0.21。就整个植物生长期来看, 祁连山海北高寒草甸地区地表反射率平均约为 0.23。

**关键词:** 植物生长期; 祁连山海北地区; 高寒草甸; 反射辐射; 反射率

**中图分类号:** S812.1 **文献标识码:** A

## The Study of Reflective Radiation and Surface Albedo of Alpine Meadow Vegetation

LI Ying-nian, ZHAO Xin-quan, CAO Guang-min, SHI Sheng-bo

(Northwest Plateau Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences, Xining Qinghai 810001, China)

**Abstract:** The Sun total radiation ( $E_g$ ) and surface reflective radiation ( $E_r$ ) were higher in Haibei alpine meadow area of Qilian mountain. The  $E_g$  and  $E_r$  were  $4227.049 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $973.556 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  respectively, during plant growing season (from April to October) by the analysis of observed data in 2000. The  $E_g$  and  $E_r$  had obvious diurnal change pattern. The instant maximum of  $E_g$  and  $E_r$  appeared about from 13:00 to 14:00, and were more than  $1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  and  $220 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , respectively. The change of  $E_g$  was influenced not only by sun's altitude but also by weather and climate in seasonal change during plant growing period. The  $E_g$  was higher if sun's altitude was more and climate was dry, whereas the change of  $E_r$  was followed by change of  $E_g$ . The  $E_g$  and  $E_r$  reached the maximum in July, then in May. The  $E_g$  and  $E_r$  were lower because of wet climate during the later plant growing period. The soil surface albedo ( $A$ ) showed as a "U" type change not only in a day but in seasonal change during plant growing period. The minimum of the soil surface albedo was 0.19, appeared at noon about in a day. The minimum of the soil surface albedo was about 0.21, appeared from May to June during the process of seasonal change, and it will decreased to 0.21, too, in other seasons if soil moisture was different. The average soil surface albedo was about 0.23 in Haibei alpine meadow area of Qilian mountain during whole plant growing period.

**Key words:** Plant growing period; Haibei area of Qilian mountain; Alpine meadow; Reflective radiation; Albedo

收稿日期: 2001-05-31; 修回日期: 2001-11-22

\* 本研究得到国家基础研究规划项目(1998040800), 中国科学院知识创新工程项目(KSCX2-1-07), 以及中国生态网络研究长期监测和中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站基金资助

作者简介: 李英年(1962-), 男, 青海乐都人, 高级工程师, 主要从事生物气象研究工作

生态系统中, 作为非生命亚系统的微气候环境, 通过对植物的生理生化作用过程, 直接或间接地影响植物群落分布、层次片结构, 以及植被生产力的形成, 是生态系统结构、功能的主要外源驱动力。因此, 研究微气候变化特征, 探讨在植物生长过程中的生理作用, 是研究生态系统的重要内容之一。高寒草甸是青藏高原寒冷高湿环境下形成的特殊植被类型, 占整个青藏高原总面积的 40%。多分布在黄河、长江的发源地, 在北部祁连山地亦有大面积分布。其牧草优质, 牲畜喜食, 支撑着青藏高原地区的畜牧业发展。如何合理利用和保护该类草甸, 将起到涵养水源, 有效控制水土流失, 防止土地荒漠化的作用, 为我国工农业可持续发展提供保证。

在高寒草甸生态系统中, 太阳短波总辐射 ( $E_g$ ), 及植被表面对其所产生的反射辐射 ( $E_r$ ) 的大小, 反映了植物群落对太阳辐射能吸收的多少, 在系统能量流动及其物质循环过程中占据极为重要的作用。研究高寒草甸植被表面的  $E_g$ 、 $E_r$  及植被反射率 ( $A$ ), 不仅可认识其能量的分配过程, 而且也将对了解高寒草甸生态系统中生命与非生命系统间的关系, 揭示系统间内部运行规律等具有重要的意义。过去对高寒地区的反射辐射等研究多有报道<sup>[1-6]</sup>, 但条件限制多为零星的路线性考察资料。本文以 2000 年的实际测定数据, 对祁连山海北高寒草甸地区在植物生长期内的  $E_g$ 、 $E_r$  及  $A$  给予系统分析。目的在于揭示高寒草甸生态系统中下垫面热量平衡中能量分配差异, 找出局地小气候形成的机制及其分布规律, 发挥其交叉学科的研究功能, 为深入研究高寒草甸生态系统的物质交换和能量流动提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 自然概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)进行。地处青藏高原东北隅, 祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河河谷地区, 位于  $101^{\circ}19'E$ 、 $37^{\circ}37'N$ , 3240m SL。植被以寒冷中生、多年生地下芽草本植物矮高草 (*Kobresia humilis*) 为建群种的典型高寒草甸。地势平坦, 植被分布均匀。土壤为高山草甸土,

土层浅薄, 土壤含水量为 38% ~ 45%<sup>[7]</sup>。

### 1.2 材料

辐射及各分光辐射观测在该站气象站进行, 观测高度于离植被冠丛上方 1.5m 处。本文以 2000 年植物生长期 4~10 月观测资料进行分析。观测采用北京时间, 以 20h 划分日界。数据系每 h 正点前后 5min 自动采集并输出其 10min 平均值及其 h 累计值。仪器由长春气象仪器研究所提供, 上年度 10 月由中国科学院大气物理研究所中国生态研究网络大气分中心统一安排进行技术标定。

## 2 结果与分析

### 2.1 太阳总辐射 ( $E_g$ )、植被反射辐射 ( $E_r$ ) 及植被反射率 ( $A$ ) 日变化特征

生态系统的一切能量源自太阳辐射, 地表能量转换分配过程都从吸收太阳辐射开始, 并向外部空间以长波辐射而结束。到达植被表面的太阳辐射除一部分用在植物光合和呼吸作用上, 一部分将被下垫面所反射, 还有一部分以感热、潜热及土壤热传导的形式传输到大气和土壤。辐射能量的差异既决定地~气流的不同, 也决定异地的气候差异状况, 因而也影响着植被、土壤分布类型, 以及植物的生长发育和自然景观格局的分异。生态系统中能量流动及物质循环的物理过程, 最终归结于辐射能量收支差异的分配。如果说  $E_g$  的大小反映一个地区接受光能力多少, 而  $E_r$  大小则反映该地由于下垫面性质差异对太阳辐射的反射能力, 从而也决定植物群落能量再分配的过程。

选取 2000 年 4~10 月 (4 月下旬到 10 月上旬) 各月典型晴天状况下, 4 月 21 日 (返青初期), 5 月 19 日 (生长初期)、6 月 19 日 (近夏至日, 强度生长期)、7 月 14 日 (开花期)、8 月 22 日 (成熟初期)、9 月 15 日 (枯黄初期), 10 月 17 日 (枯黄期) 为研究个例。7d 日平均云量分别为 1.3、2.7、1.0、0.3、3.0、1.7 和 4.0 成, 且云系多分布于四周高山附近, 对太阳遮蔽较少。通过上述 7d 的  $E_g$ 、 $E_r$  测定结果, 给出祁连山海北高寒草甸地区晴天状况下植物生长期  $E_g$ 、 $E_r$  和  $A$  的日变化状况 (见图 1)。

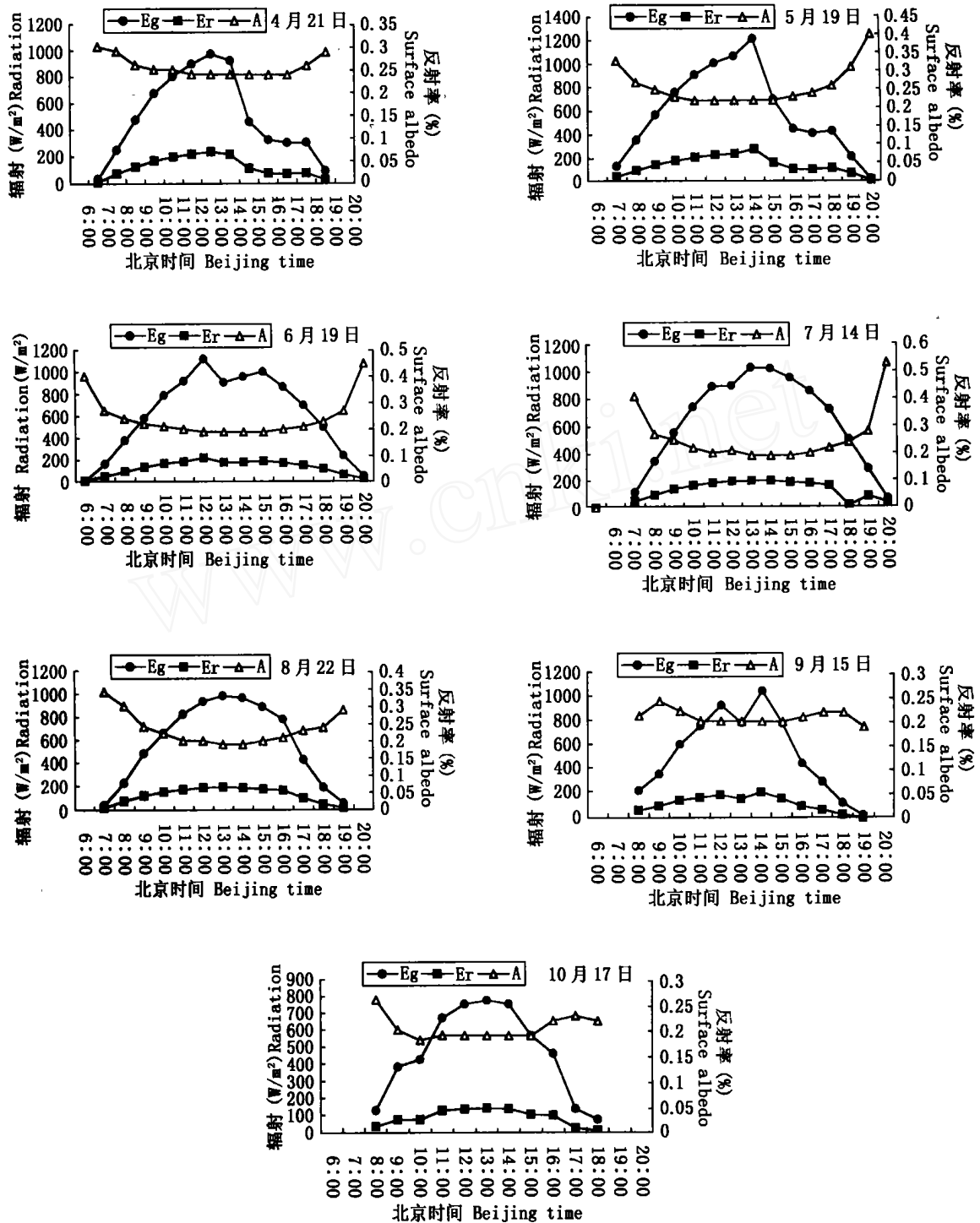


图 1 晴天状况下  $E_g (W \cdot m^{-2})$ 、 $E_r (W \cdot m^{-2})$  与 A 值日变化

Fig 1 The diurnal change of  $E_g (W \cdot m^{-2})$ ,  $E_r (W \cdot m^{-2})$  and A under sunny conditions

2 1 1 海北高寒草甸地区由于海拔高, 大气水汽、气溶胶等含量明显减少, 空气清洁, 大气透明, 太阳总辐射较低海拔地区强而丰富。5月19日14h瞬时最大值为  $1207 W \cdot m^{-2}$ , 仅比太阳常数 ( $1360 W \cdot m^{-2}$ ) 小  $153 W \cdot m^{-2}$ 。较大值出现常在天空有中高

云存在, 且未遮蔽太阳的天气状况下, 致使辐射仪不仅接受太阳的直接照射, 而且也易接受较高云的散射照射作用(图1)。7月6日天空多云(图2), 在14h瞬时最大达  $1253 W \cdot m^{-2}$ , 仅比太阳常数小  $107 W \cdot m^{-2}$ , 另外, 在6月2日曾出现  $1276 W \cdot m^{-2}$  的高

值。瞬时高值与五道梁地区的测定结果( $1228W \cdot m^{-2}$ )基本一致<sup>[2,6]</sup>。同时表明,植物生长期向 $E_g$ 日瞬时最高值不仅按太阳高度角的变化而变化,而且与天空云系分配、气溶胶含量等有关。1d间呈现单峰式曲线变化过程,上午日出后随太阳照射的时间推移急剧升高,下午依太阳高度角的降低迅速急剧下降。但在植物生长期内的不同时期,所表现的日变化略有不同,一般在降水较少的5~6月瞬时最大值较高,在太阳高度角相对低,雨水充沛的8~10月稍低。

**2.1.2**  $E_r$ 日变化规律与 $E_g$ 同步,只是量值较小。在太阳高度角相对较低的4月21日和10月17日显得较低,日瞬时最大值分别为 $238W \cdot m^{-2}$ 和 $145W \cdot m^{-2}$ ,出现于13h,2d对应总量分别为 $5.85MJ \cdot m^{-2}$ 和 $3.78MJ \cdot m^{-2}$ 。在太阳高度角较高,天气凉爽的6月19日和7月14日, $E_r$ 日瞬时最大值分别为 $216W \cdot m^{-2}$ 和 $194W \cdot m^{-2}$ ,分别出现于12h和13h,2d日总量分别达 $6.57MJ \cdot m^{-2}$ 和 $6.97MJ \cdot m^{-2}$ 。

**2.1.3** 晴天状况下,A变化在不同时期所表现的趋势一致,在早晚高,中午前后低。日间呈“U”型分布状况。其分布主要与太阳高度角的变化有关。太阳高度角的改变,可使太阳光线的入射角和辐射光谱成分发生变化。首先,到达地表面的太阳光光谱组成由于在地球大气所通过的路线长短发生变化;另外,太阳光线在不同时间其入射角发生变化,当太阳高度角低时,太阳辐射光谱中长波部分占有较大比重,而地表对长波(红外)辐射部分的反射能力总是很强,当太阳高度角低时,到达地表的入射角大,其反射能力就强。因而,在太阳高度角低的早晚,地表反射率大。反之,随太阳高度角的增加,太阳辐射中短波的波长部分所占的比重增大,入射角减小,导致A的减小,这种影响在太阳高度角低时更为显著<sup>[8]</sup>。

植物生长期期间,在中午A值较低,在不同时期略有差异,主要因受下垫面性质的改变而不同。在4月21日,由于冬春放牧及季节干燥、强劲风速等影响,地表近似裸露,土壤表层干燥,使A值增高,最低为0.24,且从12~17h持续近6h,日均0.26。当生长加快,植被盖度加大,中午前后的A值较小,如6月19日和7月14日,该期为海北站牧草旺盛生长期,植被盖度约在80%左右。此时尚未开花,植被多呈深绿色,致使A值分布较低,两日最低为0.19,

从12~15h间0.19值持续近4h,2d日平均分别为0.25和0.26。其中,8~18h为0.21,比4月21日同时间(0.25)低0.04。从成熟期到枯黄期阶段,A值由于受牧草鲜艳花色、成熟后植被颜色等形态的改变(向浅色发展)等,造成地表A值增大。如8月22日、9月15日和10月17日,日间A值最低分别为0.19、0.20和0.19(本年度10月由于降水多,土壤潮湿,A值在10月显得相对较低),3d8~18h分别为0.22、0.21和0.21。

上述分析表明,植物生长期期间,A值随季节变化,呈以下特征:

**2.1.3.1** 受下垫面裸露及地表干燥等影响,在牧草返青初期A值高。

**2.1.3.2** 牧草旺盛生长期,由于植被颜色深,加之太阳高度角低,A值较低。

**2.1.3.3** 植物生长后期,由于受花色、植被枯黄后下垫面颜色改变等影响,A值较高。但2000年在该期降水丰沛,土壤湿度较高,致使A值也出现较低量值。

**2.1.3.4** 从7个典型代表日看出,太阳高度角低的春秋两季,A的日平均值高于植物旺盛生长、植被盖度大、太阳高度角高的夏季。

**2.1.4** 为了比较阴天多云天状况下 $E_g$ 、 $E_r$ 及A的变化情况,笔者选择全天为阴天的6月23日和7月27日,及多云的6月20日和7月6日,分析阴天及多云天状况下海北地区 $E_g$ 、 $E_r$ 及A的变化情况(图2)。结果表明,阴天状况下, $E_r$ 是依 $E_g$ 的变化而变化,但阴天时, $E_g$ 主要由云系分布、空气水汽含量等对直接辐射散射作用后的散射辐射起作用。

6月23日和7月27日,整日为蔽光高层云,云层厚而稳定,日均云量为10.0成。其中6月23日在19~19:25h有微量降水(0.0mm),7月27日在后半夜及8:00~9:08h、17:46~20:00h有较多降水(夜间20.3mm,白天3.3mm)。上述2d瞬时最高分别为 $221W \cdot m^{-2}$ 和 $106W \cdot m^{-2}$ ,出现于12h和14h,日变化均随 $E_g$ 的变化而变化(图2),峰值只是随云层的厚薄所产生散射辐射强度不同而异,云层较薄时 $E_r$ 比云层厚时高,多云天也有相同的变化规律。图2还可看到,阴天或多云天状况下A值的日变化(特别是上午)与晴天状况有所不同,在晴天A的“U”型分布较为明显,而阴天或多云天,A的日变化较为复杂,甚至不产生“U”型分布,只是在下午变

化趋势一致, 表现有所提高。这种变化的不同, 是由于晴天条件下, 早晨温度往往较阴天天低, 在海北站地区最暖的 7 月常出现最低气温小于 0 的可能, 早晨易出现露水、结霜等现象, 致使植被表面形成“水”的“镜面”作用, 从而提高了下垫面的 A 值。在

阴天天气, 早晨温度不是很低, 植被表面相对干燥, 加之云对太阳光线的遮蔽作用较大, 太阳直接辐射弱于散射辐射, 总辐射以散射辐射作用为主, 因而不受或少受太阳高度的控制, 使 A 值变化相对平稳, 而且量值亦较低。

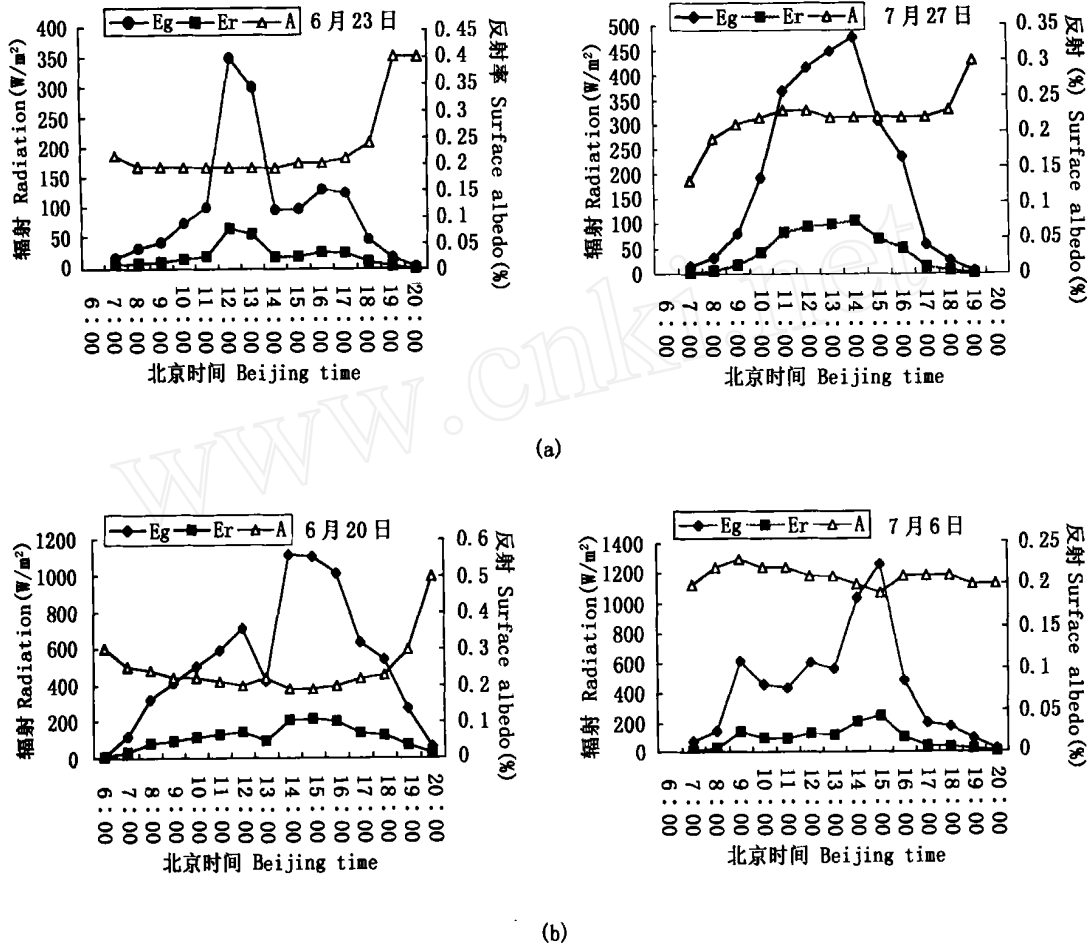


图 2 阴天(a)或多云(b)状况下  $E_g$  ( $W \cdot m^{-2}$ )、 $E_r$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) 与 A 值日变化  
 Fig 2 The diurnal change of  $E_g$  ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $E_r$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) and A under overcast(a) and cloudy(b) conditions

2.2 实际天气状况下  $E_g$ ,  $E_r$  及 A 值季节变化

2.2.1 4~10月(包括雨天)观测结果, 海北高寒草甸地区  $E_g$  季节变化较复杂, 最高在 7 月 ( $747.783 WJ \cdot m^{-2}$ ) (表 1), 5 月次之 ( $708.725 WJ \cdot m^{-2}$ ), 最低在 10 月 ( $447.491 WJ \cdot m^{-2}$ )。该变化一则与 2000 年 7 月的干旱有关, 二则与 9~10 月降水较多, 太阳高度角较低等有关。4~10 月, 植物生长期间总辐射量为  $4227.049 WJ \cdot m^{-2}$ , 占该期理想总辐射量的 58% 左右。另外按不同太阳光谱的分布来看, 300~400nm 的紫外辐射, 400~700nm 的光合有效辐射

大于 700nm 的红外辐射, 这三段占  $E_g$  的百分率分别为 5.2, 39.6 和 55.2。

2.2.2 植物生长期测定结果(表 1), 海北地区在 5 月由于降水较低, 空气干燥,  $E_r$  值月总量最高, 为  $179.374 WJ \cdot m^{-2}$ , 在 7 月上中旬干旱少雨, 加之接近夏至日, 太阳高度角较高, 7 月总量为  $157.927 WJ \cdot m^{-2}$ , 属次高月。9~10 月太阳高度角降低, 且降水相对丰富, 致使  $E_r$  值为最低时期, 两月平均为  $95.294 WJ \cdot m^{-2}$ 。季节变化特征是: 5~7 月高, 生长的初期和末期较低。但由于受降水、云系、大气尘埃

等影响,波动性也较强,变化显得复杂。海北地区在4~10月间,  $E_r$  总量为  $973\ 556\text{WJ} \cdot \text{m}^{-2}$ , 日均

$4\ 549\text{WJ} \cdot \text{m}^{-2}$ , 结果高于我国东部地区<sup>[1]</sup>, 与青藏高原中部地区基本一致<sup>[2,4]</sup>。

表1 太阳总辐射  $E_g(\text{WJ} \cdot \text{m}^{-2})$ 、反射辐射  $E_r(\text{WJ} \cdot \text{m}^{-2})$  及反射率  $A$  的变化(4~10月)

Table 1 The monthly change of sun total radiation ( $E_g$ ), reflective radiation ( $E_r$ ) and surface albedo ( $A$ ) (from April to October)

月份 Month	4	5	6	7	8	9	10	合计
$E_g$	598 343	708 725	613 246	747 783	654 527	456 934	447 791	4227 049
$E_r$	179 374	174 051	128 293	157 927	142 433	95 324	96 154	973 556
$A$	0.30	0.25	0.21	0.21	0.22	0.21	0.21	0.23

2.2.3  $A$  值从4~10月呈“U”型变化结果。其中在返青前的4~5月,由于受冬春放牧及恶劣环境条件影响,地表近似裸露,气候干燥,期间  $A$  值较高,4月平均为0.30。随降水增加,牧草生长,植被盖度加大,以及地表颜色的加深和气候变得湿润,6~7月  $A$  值最低,平均为0.21。在牧草开花、结实,以及后期降水减少,气候逐渐变干,  $A$  值有所升高。2000年由于9月降水丰沛(达116.1mm)出现低值。

高寒草甸区植被分布均匀,盖度大,多属湿润或半湿润环境,其地表反射率是比较低,2000年生长期  $A$  值为0.23,该值比荒漠地区低<sup>[5]</sup>。比五道梁地区稍高,比黑河地区小了近10个百分点<sup>[9]</sup>。与西藏改则地区基本一致<sup>[4]</sup>。这些差异表明,海北地区比西藏地区纬度较高,太阳高度角较低,同时与该地区有较好的植被盖度等有关。2000年夏季较为干旱,  $A$  值观测结果与1998年同区相比,低2个百分点<sup>[10]</sup>,说明气候干燥也是影响  $A$  值的一个重要因素。

### 2.3 实际天气状况下 $E_g$ 值估算

2000年植物生长期各月  $E_g$  占理想总辐射的百分率与海北气象站测定的日照百分率变化进行比较(图3),其变化趋势一致。为此,利用海北站近2年的测定资料对该地区植物生长期间的  $E_g$  模拟估算式<sup>[9]</sup>:

$$E_g = E_{g0}(0.4728 + 0.2244S/S_0)$$

式中  $E_{g0}$  为4~10月的月理想太阳总辐射;  $S$  为月实际日照时间;  $S_0$  为月可照时间。结果表明,模拟的拟合率较高(见表2),其相对误差很低,达极显著水平( $P < 0.01$ ,  $r = 0.9683$ ,  $n = 6$ ),为该地区对  $E_g$  的估算提供便利。

由于2000年4~10月,日照百分率为54%,其中7月是海北站地区历年同期月降水显著偏少的月份,致使日照百分率比多年平均偏高4个百分点,从而可认为,2000年在植物生长期间的  $E_g$  比多年平均稍偏大,即海北地区4~10月  $E_g$  的多年平均应较2000年的  $4227.049\text{WJ} \cdot \text{m}^{-2}$  稍低。

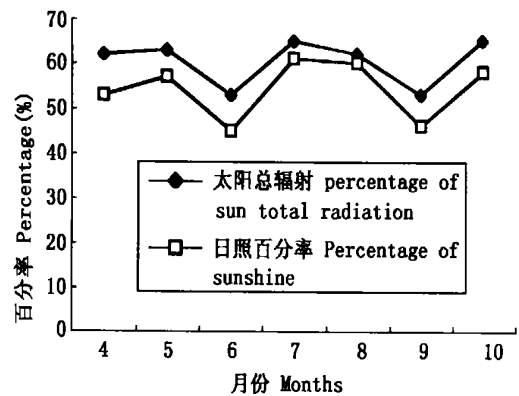


图3  $E_g$  百分率与日照百分率比较

Fig. 3 The comparison between  $E_g$  percent and sunshine percent under the real weather condition

表2  $E_g(\text{WJ} \cdot \text{m}^{-2})$  实际值与模拟值比较(4~10月)

Table 2 The comparison between real value and simulated value of sun total radiation ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (from April to October)

月份 Month	4	5	6	7	8	9	10
实际值 Real value	598 343	708 752	613 246	747 783	654 527	456 934	447 791
模拟值 Predicted value	574 674	677 621	658 776	704 353	641 182	494 145	414 677
相对误差 Relative error	- 3.96	4.39	7.42	5.81	- 2.04	8.14	- 7.39

### 3 结语

综上所述, 祁连山海北高寒草甸地区  $E_g$ 、 $E_r$  及  $A$  在植物生长期季节变化有以下特征。

**3.1** 祁连山海北高寒草甸地区,  $E_g$ 、 $E_r$  具有较高的水平值, 二者日变化规律明显, 日间瞬时最大分别可达  $1200\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $220\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  以上, 出现时间一般在北京时间 13h~14h。4~10 月  $E_g$  和  $E_r$  的总量分别达  $4227.049\text{WJ} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $973.556\text{WJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

**3.2** 植物生长期季节变化过程中  $E_g$  的变化一方面受太阳高度角影响, 另一方面受天气气候影响, 表现在太阳高度角高或气候干燥时  $E_g$  较大, 而  $E_r$  的变化是依  $E_g$  的变化而变化, 二者在 7 月最高, 5 月次之, 在生长后期, 由于气候湿润,  $E_g$  和  $E_r$  均显得较低。

**3.3** 地表反射率 ( $A$ ) 不论在日变化还是季节变化, 均呈“U”型变化过程。其中日间在中午前后最低, 最低可达 0.19, 季节变化以 6~7 月最低, 约为 0.21。当然用土壤湿度的不同, 在其它时期也可降至 0.21。就植物整个生长期平均而言, 祁连山海北高寒草甸地区地表反射率约为 0.23。

**3.4** 2000 年植物生长期各月  $E_g$  占理想总辐射的百分率与海北站气象站测定的日照百分率变化比较结果表明, 二者变化趋势一致。为此可采用  $E_g =$

$E_{g0} (0.4728 + 0.2244S/S_0)$  计算式估算海北高寒草甸地区的  $E_g$  值。

### 参考文献

- [1] 陈有虞 青藏高原那曲地区的辐射状况及其年变化特征[J]. 高原气象, 1985, 4(4): 50~66
- [2] 江灏, 季国良 五道梁地区的辐射特征[J]. 高原气象, 1988, 7(2): 145~155
- [3] 贲桂英, 韩发, 师生波, 卢存福 高寒草甸生态系统微气候和植物的生理生态反应[A]. 见: 高寒草甸生态系统(3)[C]. 北京: 科学出版社, 1991. 35~44
- [4] 沈志宝, 左洪超 青藏高原地区反射率变化的研究[J]. 高原气象, 1993, 12(3): 294~301
- [5] 季国良, 邹基玲 干旱绿洲和沙漠辐射收支的季节变化[J]. 高原气象, 1994, 13(3): 323~329
- [6] 代加洗, 李鹏杰, 苏宏德 唐古拉山地区辐射状况和冷热源的探讨[A]. 见: 青藏高原气象论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1977. 176~193
- [7] 李英年, 王启基, 周兴民, 曹广民 高寒草甸植物群落的环境特征分析[J]. 干旱区研究, 1998, 15(1): 54~58
- [8] 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成, 高家表 小气候和农田小气候[M]. 北京: 农业出版社, 1991. 14~18
- [9] 吴艾笙, 钟强 黑河实验区地表反射率与植被指数的季节变化[J]. 高原气象, 1992, 11(4): 440~450
- [10] 李英年, 师生波, 曹广民, 杨勇刚, 沈振西 祁连山海北高寒草甸地区微气候特征的观测研究[J]. 高原气象, 2000, 19(4): 512~519