

文章编号: 1008-2786-(2006)3-298-08

海北高寒草甸生态系统定位站辐射气候特征

李英年, 赵亮, 徐世晓, 赵新全, 周华坤, 古松
(中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

摘 要: 以 2000-03 到 2001-02 的辐射观测资料, 分析了海北高寒草甸生态系统定位站地区辐射及各分光辐射的变化特征, 将为高寒草甸生态系统的物质循环、能量流动、草地生产力形成机制等问题的研究提供科学依据。结果表明: 海北站区 E_g 、 E_k 、 UV 、 PAR 、 $NIIR$ 和 En 具有明显的日、年变化, 年内其总量分别达 $6\,278\,867\text{ MJ/m}^2$ 、 $1\,515\,139\text{ MJ/m}^2$ 、 $311\,242\text{ MJ/m}^2$ 、 $2\,576\,777\text{ MJ/m}^2$ 、 $3\,397\,404\text{ MJ/m}^2$ 和 $2\,542\,950\text{ MJ/m}^2$, 其中在植物生长期的 5~9 月分别为 $3\,181\,215\text{ MJ/m}^2$ 、 $698\,021\text{ MJ/m}^2$ 、 $165\,955\text{ MJ/m}^2$ 、 $1\,133\,965\text{ MJ/m}^2$ 、 $1\,673\,871\text{ MJ/m}^2$ 和 $1\,668\,805\text{ MJ/m}^2$ 。年内 E_k 、 UV 、 PAR 、 $NIIR$ 和 En 占 E_g 的比例分别为 0.242 、 0.048 、 0.410 、 0.540 和 0.410 , 在植物生长期分别为 0.219 、 0.052 、 0.413 、 0.528 和 0.527 。对 E_g 和 PAR 提出了下列形式的模拟求算式: $E_g = E_{g0}(0.0897 + 0.9768S_0/S_0)$ 和 $PAR = -3.8044 + 0.4177E_g$, 模拟效果较好, 可利用有关常规气象观测资料进行估算。

关键词: 高寒草甸; 生态系统; 辐射; 气候特征

中图分类号: Q151.5

文献标识码: A

不同地区因受地理纬度、海拔高度、下垫面性质差异等综合因素的影响, 致使地表接受太阳辐射能不同, 从而导致气象要素分布差异明显。中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)作为国家重点野外研究实验站, 在草地生态系统特别是青藏高原高寒草甸生态系统的研究工作中起着重要的作用。多年来, 海北站长期以生态系统及各组分相互协调开展研究工作, 对广布于青藏高原的高寒草甸生态系统的结构、功能、能量流动、物质循环及其提高生产力的途径进行了系统研究, 积累了大量的宝贵资料, 并取得了显著的成绩。但因条件限制海北站除进行常规气象项目观测外, 对于辐射及各波段辐射观测只在 1998 年生态网络研究开始时进行了观测, 而观测系统又由于仪器本身性能、寒冷条件等因素的制约影响, 大多数辐射数据出现不连续性。

我们也曾报道过植物生长期内的有关辐射的变化情况⁽¹⁻³⁾。观测发现自 2000-03 至 2001-02 数据较为连续准确, 为此本文以该期观测资料, 对该地区辐射状况予以分析报道。旨在为高寒草甸生态系统的研究工作及辐射、能量平衡和能量流动方面的研究工作, 以及学科相互交叉的研究等提供依据。

1 地理环境背景与资料观测

1.1 研究点地理位置及环境气候特征

海北站地处青藏高原东北隅祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷西段, 地理位置为 $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}45'N$, $101^{\circ}12' \sim 101^{\circ}23'E$, 站区地形开阔, 海拔在 $3\,200 \sim 3\,600\text{ m}$ (气象观测站海拔高度为 $3\,220\text{ m}$); 北部~西北部处为高耸的冷龙岭, 山脊平均海拔 $4\,600\text{ m}$, 主峰——岗什卡峰海拔 $5\,254.5\text{ m}$,

收稿日期 (Received date): 2005-09-11; 改回日期 (Accepted): 2005-12-30

基金项目 (Foundation item): 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-01A)、国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412501)、中日合作“以 21 世纪亚洲陆地生态系统碳管理为目标的综合碳收支研究”及中日合作“亚太地区环境创新战略计划 (APEIS)”资助。[Knowledge Innovation of CAS (NO. KZCX1-SW-01-01A), State Key Basic Research on Development Strategy (NO. 2002CB412501), Sino-Japan cooperation of "Comprehensive Carbon Budget Study in Asian Terrestrial Ecosystem Carbon Management" and Sino-Japan cooperation of "Asia-Pacific Environmental Innovation Strategy (APEIS)".]

作者简介 (Biography): 李英年 (1962-), 男, 高级工程师, 从事生物气象研究工作 [Li Yingnian (1962-), Senior Engineer, Major research field in Biometeorology. E-mail: ynl@nwipb.ac.cn]

常年积雪,并发育着现代冰川;南-东南以宁张(西宁-张掖)公路为界,与青海浩门农场接壤;西-西南部被永安河、大通河所环绕,与门源县的皇城、苏吉滩二乡毗邻;在站区西南约15 km处是平均海拔4 000 m的达板山^[4]。

该地区位于亚洲大陆腹地,具明显的高原大陆性气候,东南季风及西南季风微弱。受高海拔条件的制约,气温极低,按气候四季的标准划分,这里全年皆冬,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,干湿季分明;空气稀薄,大气透明度高,年平均空气密度约为 0.8496 kg/m^3 。近20 a气象要素统计发现,海北站地区多年平均气温为 -1.6°C ,降水量约560.0 mm,年日照时间可达2 467.7 h,水面蒸发1 238.0 mm,平均风速较低,年平均仅为 1.7 m/s ,空气相对湿度为67%,平均气压691.4 hPa,表现出该地区空气稀薄,气温较低,年内无霜期极短,降水量相对丰富,日照充足。年内无绝对无霜期,相对无霜期约为20 d左右,在最热的7月仍可出现霜冻、结冰、降雪(雨夹雪)等冬季的天气现象。表现出冷季寒冷、干燥、漫长,暖季凉爽、湿润、短暂^[4]。

青藏高原隆起过程所形成的特殊自然环境,造就了适应寒冷湿中生的多年生草本植物群落,形成了以矮嵩草(*Kobresia tibetica*)草甸、金露梅灌丛(*Fomation Dasiphora fruticosa*)草甸、小嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸以及藏嵩草(*Kobresia tibetica*)沼泽草甸为主要建群种的不同的植被类型。牧草生长低矮,群落结构简单,初级生产力低等^[5]。土壤以洪积-冲积物、坡积-残积物及古冰水沉积物在不同水热条件下,受植被改造发育在滩地和阳坡多有草毡寒冻雏形土(Mat-Cryic Cambisols)、山地阴坡多分布暗沃寒冻雏形土(Mol-Cryic Cambisols)以及沼泽地的有机寒冻潜育土(Organic Cryic Gleysols)大量分布,具有土壤发育年青,土层浅薄,有机质含量丰富等特征^[4,6]。

1.2 2000-03到2001-02海北站地区的气候状况

对2000-03到2001-02有关气象要素观测表明,一周年期间是气温较高降水偏少的一年。年平均气温 -1.4°C ,降水量为520 mm,其中2000年植物生长期的5~10月平均气温为 6.6°C ,较20 a平均偏高 0.7°C 。气温在4~8月略有偏低,5~6月偏高明显,特别是7月偏高达 2.2°C 。在7月上中旬连续出现了有器测以来少有的高温天气,以致于

使7月降水量较多年平均偏少40%,日照时间则偏高近60 h。气候的这种分布,使该地2000年的地表能量分配与多年平均略有差异。

1.3 资料观测

数据观测在海北站气象站内进行,观测高度在植被冠层上方1.5 m处。观测项目包括有280~3 200 nm的总辐射、反射辐射,280~400 nm的紫外辐射、400~700 nm的光合有效辐射及700~3 200 nm等个不同波段辐射要素。观测采用北京时(该地区地方时比北京推迟1 h 15 min),日界按国家气象站为标准。数据系每一小时正点前后5 min自动采集并输出其10 min平均通量值及小时累积值。仪器为长春气象仪器研究所提供锦州三二二生产的分光辐射传感器,每年10月由中国科学院大气物理所进行技术标定,灵敏度在 $7\sim 14\text{ }\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$,年内灵敏度变化率 $<2\%$ 。本文分析资料时还应用到同期常规气象人工观测资料。

2 辐射气候统计特征的结果与分析

2.1 太阳总辐射(E_g)

E_g 是地表面最主要的直接能源,也是地球地表净辐射及热量平衡的重要组成。太阳光辐射不仅给地球带来光明,地球上的植物生长和开花结果也是靠阳光来维持。植物体内的叶绿素须要利用太阳光的能量进行光合作用,把从根部吸收来的水分解为氢和氧,使氧气与空气中吸收来的 CO_2 结合形成碳水化合物,碳水化合物又是动物维系生命的食物。表明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。不同地区 E_g 的差异分布既决定了地-气环流的不同,也决定了异地的气候差异状况,因而也影响着地区的植被、土壤分布类型,以及植物生长发育和各种自然景观格局的分异。

在海北站地区,不同季节 E_g 的日变化有所不同。1~4月10月日瞬时最高分别可达 610 W/m^2 、 $1\,050\text{ W/m}^2$ 、 $1\,150\text{ W/m}^2$ 、 780 W/m^2 以上(图略),这种变化与太阳高度在年内不同时期的分布有关。因季节变化不同时期日出(落)时间不一致,加之太阳高度角及大气气溶胶的不同分布,各期所表现的日变化差异明显。一般在日出后辐射通量值随太阳照射的时间推移急剧升高,到13:00(13:15为海北站日正午,是日间太阳高度角最高时期)左右达最大,

下午依太阳高度角的降低迅速下降,表现出 1 d 间呈现单峰式曲线变化过程。但在雨季(特别是植物生长期内)时期, E_g 的日变化受云系和降水时间分布影响,日变化规律有所改变,表现较为复杂。从观测到的资料来看,年内瞬时最大值接近太阳常数,如 05-19T 14:00 和 07-06T 14:00 分别为 $1\,207\text{ W/m}^2$ 和 $1\,253\text{ W/m}^2$, 仅比太阳常数 ($1\,360\text{ W/m}^2$)^[6] 小 153 W/m^2 和 107 W/m^2 , 瞬时高值与五道梁地区的测定结果 ($1\,228\text{ W/m}^2$) 基本一致^[7]。较大值的出现常在天空有一定中云存在,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。

就所观测的 1 a 资料来看,海北站地区 E_g 具有较高的年总量,年内可达 $6\,278\,867\text{ MJ/m}^2$, 在植物生长期的 5~9 月为 $3\,181\,215\text{ MJ/m}^2$ 。年内季节变化明显,但因受雨季的影响作用,随季节进程变化复杂,月最高值在 7 月,为 $747\,783\text{ MJ/m}^2$ (图 1), 月次高值在 5 月,为 $708\,725\text{ MJ/m}^2$; 月最低值在 12 月,为 $340\,260\text{ MJ/m}^2$ 。这种变化与太阳高度角的分布有关,当然也与 2000-07 的干旱相联系。年内太阳总辐射量占当地理想总辐射的 62% 左右,其中 5~9 月占该期间理想总辐射量的 55% 左右。

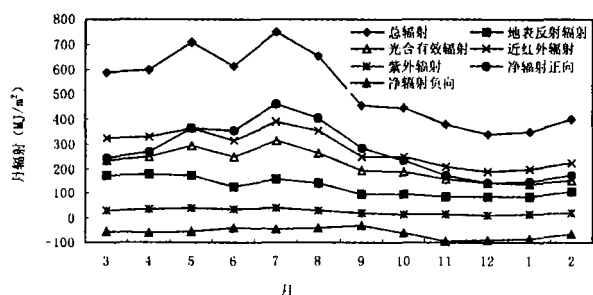


图 1 海北站地区 E_g , E_r , UV , PAR , NIR 和 E_n 的月际变化

Fig. 1 The monthly variation of E_g , E_r , UV , PAR , NIR and E_n at Haibei Station

各月 E_g 占理想总辐射的百分率与气象站测定的日照百分率变化趋势一致。为此,采用较常用计算实际总辐射的方法,提出 E_g 的模拟估算式有

$$E_g = E_{g0} (0.0897 + 0.9768S/S_0)$$

式中 E_{g0} 为月理想太阳总辐射; S 为月实际日照时间; S_0 为月可照时间。上式模拟拟合率较高,相对误差很低,经显著性检验达极显著检验水平,这给该地区对 E_g 的估算提供了较好的便利。

由于 2000 年植物生长期及前后的 4~10 月,日

照百分率为 54%, 特别是 7 月是海北站地区历年同期月降水显著偏少的月份,致使植物生长期内的日照百分率比多年平均偏高 4 个百分点。而在冬季,因降水少,空气干燥所表现出的辐射量在各年间变化基本一致。从而可认为,2000 年在植物生长期内的 E_g 比多年平均稍偏大。也就是说,海北站地区 4~10 月 E_g 的多年平均应较 2000 年的 $4\,227\,049\text{ MJ/m}^2$ 稍低,根据模拟方程对多年情况进行简单的估算,海北站地区年总辐射量平均约为 $6\,082\,849\text{ MJ/m}^2$ (其中植物生长期的 5~9 月为 $2\,921\,217\text{ MJ/m}^2$) 更为确切。

2.2 地表反射辐射 (E_r) 及反射率 (A)

E_r 日变化规律与 E_g 同步,只是量值较小。1, 4, 7, 10 的 4 个月日瞬时最大值分别可在 200 W/m^2 、 238 W/m^2 、 238 W/m^2 和 145 W/m^2 以上。年内出现瞬时最大值可达 238 W/m^2 , 出现时间与 E_r 出现时间是相同的。

E_r 的月变化表明 (见图 1), 海北高寒草甸地区 E_r 在 5 月由于降水较低,空气干燥,月总量最高,为 $179\,374\text{ MJ/m}^2$; 在 7 月上中旬干旱少雨,加之该月离夏至日相对接近,太阳高度角较高,7 月总量为 $157\,927\text{ MJ/m}^2$, 是植物生长期内 E_r 出现的次高月。这与 E_g 的变化 (7 月最高,5 月次高) 略有不同,是因为 7 月植物生长最为强盛,植被盖度大,且处于绿色状况,而 5 月高寒植物仍处于萌动发芽到返青阶段,地表植被盖度低,地表面因冬春牧事活动近似裸露,地表颜色浅,故有较大的反射辐射。9~10 月因太阳高度角降低,且在 2000 年度的该期降水相对丰富,致使 E_r 在植物生长期为最低时期,两月平均为 $95\,739\text{ MJ/m}^2$, 比太阳高度最低的 12 月到翌年 1 月平均 ($85\,631\text{ MJ/m}^2$) 仅高 $10\,108\text{ MJ/m}^2$ 。随季节进程所表现的特征基本是:随太阳高度角的降低 E_r 降低,但在植物生长期内的 5~9 月,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。全年内 E_r 总量为 $1\,515\,139\text{ MJ/m}^2$, 其中植物生长期的 5~9 月为 $698\,021\text{ MJ/m}^2$ 。这比我国东部地区要高^[10], 与青藏高原中部地区基本一致^[8, 11, 12]。

A 的日变化在不同时期所表现的趋势似乎一致,一般在早晚高,中午前后低。日间为一“U”型分布状况 (图略)。这种分布主要与太阳高度角的变化有关。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 减小, 这种趋势在太阳高度角较低时更为显著^[13 14]。

A 在中午较低值的出现, 在不同时期略有差异, 主要归于受下垫面性质的改变而不同。在植物非生长期的 10 月到次年植物生长初期间, 植物枯黄, 冬春放牧活动频繁, 及其季节干燥、强劲风速等影响, 前期地表颜色发黄发白, 后期地表近似裸露, 土壤表层干燥, 加之气温低有积雪存在时不易及时融化, 致使 E_r 出现较高的值, 导致 A 增高。随季节进程植物生长加快, 植被盖度加大, 中午前后的 A 值较小, 如 6~7 月间, 该期为海北站牧草旺盛生长期, 植物生长极为迅速, 植被盖度很大 (约在 80% 左右)。并且由于牧草并未进入开花期, 植被表面多呈深绿色, 致使 A 值分布较低, 最低可降至 0.19 左右。而在 2~3 月的部分日, 因气候干燥植被枯黄和有降雪并在地表积雪达 5 cm 厚的天气状况下, A 值可达 0.75 左右, 日平均在 0.54 以上。

1 a 的周期测定表明 (图 2), 年内 A 值的变化也表现出“U”型变化结构。其中在太阳高度较低, 有降雪的冬季高, 如 12 月虽无产生降雪现象, 但 A 平均达 0.25; 3 月和 4 月有降雪出现, 地表积雪日均在 5 d 左右, 致使 3、4 月 A 分别达 0.295 和 0.300。在海北站区虽 5 月降水逐渐增加, 温度升高, 植物进入生长初期, 但因温度仍较低, 地表常有积雪 (特别是有降水产生的早晨与上午) 存在, 故 5 月 A 仍保持较高值, 2000-05 为 0.246。随降水增加, 温度继续升高, 牧草生长发育旺盛的推进, 植被盖度加大, 以及地表颜色的加深和气候变得湿润, A 逐渐减小, 6~9 月 A 值最低, 平均为 0.212。以后随牧草生长的开花、结实, 以及后期降水减少, 气候逐渐变干, A 将有所升高。

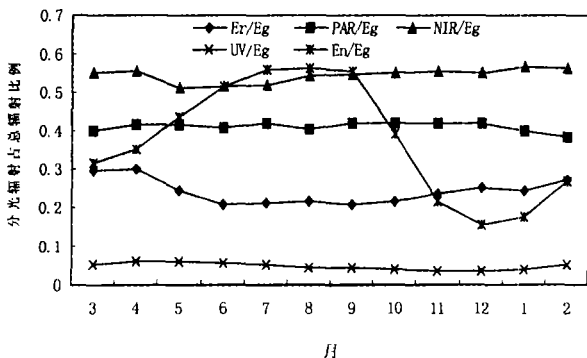


图 2 海北站地区年内各月 E_r 、 UV 、 PAR 、 NIR 和 E_n 占 E_g 比例的月际分布

Fig 2 The monthly distribution of proportion with E_r , UV , PAR , NIR and E_n to E_g in a year at Habei Station

由于高寒草甸区植被分布均匀, 植被盖度大, 多属湿润或半湿润环境, 其地表反射率与中国不同地区有不同差异, 2000-03 到 2001-02 年平均平均为 0.242, 在植物生长期内的 5~9 月 A 的平均为 0.219, 这个值比荒漠地区低^[15]。比五道梁地区稍高, 比黑河地区小了近 10 个百分点^[14 16]。与西藏改则地区基本一致^[17]。这些与不同地区比较有一定的差异表明, 海北站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, 其 A 值的观测结果与 1998 年我们在同地区的测定相比, 高 2 个百分点^[18], 说明气候干燥也是影响 A 值的一个重要因素。

2.3 近红外辐射 (NIR)

NIR 在 E_g 中占有较大的比例 (图 1)。总体来看, 2000-03 到 2001-02 的一周年时间 NIR 为 3397.404 MJ/m^2 , 占 E_g 的 54%, 植物生长期的 5~9 月为 3397.404 MJ/m^2 , 占该期总辐射的 0.529。 NIR 的月际分布与 E_g 的变化趋势一致, 即在 7 月高, 5 月次高, 12 月和 1 月最低, 分别为 388.965 MJ/m^2 、363.404 MJ/m^2 、187.419 MJ/m^2 和 198.485 MJ/m^2 。不论是日变化还是年变化, 其变化过程依 E_g 的变化及出现时间相同。

2.4 紫外辐射 (UV) 及 UV 占总辐射的比例 (η)

近年来, 受人类活动作用的加剧, 大气组分发生了一些变化, 其中大气平流层臭氧浓度锐减, 地球表面接受到的紫外辐射 (UV) 强度明显增加^[19 20]。 UV 的增加, 不仅直接影响人类健康, 威胁人类生存环境, 而且对植物生理及发育过程也有极明显的影响。高寒草甸生态系统中, 植物生长发育独特, 其形态表现出植株低矮、粗壮、植物耐寒, 叶片较厚、抗倒伏, 花色鲜艳并多呈蓝色等特征。这些特征的形成, 无疑与 UV 的调节和控制相联系。

在海北站地区, 因海拔较高 UV 所表现的量值较海拔低的区域高, 日变化与 E_g 变化同期, 在 1 月日瞬时最大为 67 W/m^2 ; 太阳高度较高, 天气凉爽的 7 月, UV 日瞬时最大可达 75 W/m^2 。年内太阳高度角相对较低时, UV 不论是瞬时值还是日总量均显得较低, 年内在最高的 5 月为 41.620 MJ/m^2 , 7 月次高 (39.873 MJ/m^2); 最低在 12 月和 1 月, 分别为 12.462 MJ/m^2 和 13.929 MJ/m^2 。这种变化趋势与 E_r 一样, 与 E_g 的变化趋势略有差异。因 2000-07 上中旬干旱少雨, 降水比多年平均偏少 40%, 少有的干旱加之该月离夏至日相对接近, 太阳高度角较

大,造成 7 月 UV 的较高量值,故认为在植物生长前期的 4~5 月是年内 UV 出现最高时期。统计 UV 总量为 $311\ 242\ \text{MJ/m}^2$,植物生长期的 5~9 月为 $165\ 955\ \text{MJ/m}^2$ 。这比我国东部地区的同期要高,与青藏高原中部地区基本一致^[18 19]。

对 2000-03 到 2001-02 UV 对 E_g 所占比例 (η) 进行统计发现(图 2)。海北高寒草甸地区(的)日变化同 E_g 及 UV 的日变化规律一样, E_g 达最大时, η 值为最高。 η 值一日间中午最高在 0.050 以上,最大达 0.079,在太阳高度角高离夏至日较近时期,因 E_g 较大,(值较高,如中午 14:00 η 值可达 0.072 左右;气候相对干燥的春夏交替阶段, η 值较雨水充沛的夏秋阶段高,如 4~6 月平均为 0.052,比 7~10 月平均 0.046 要高 0.006。同时表明,一日内 η 值似乎表现出上午较低,而下午较高。

η 的年平均为 0.048,其中植物生长期的 5~9 月为 0.052,冷季(10 至翌年 4 月) 0.045,这些值高于戴加洗于 1976 年在唐古拉地区的同期测定值(约 0.032)^[20],也明显高于当时在相同时期在拉萨(约 0.027)、西宁(约 0.022)及上海(约 0.025)等地的测定值^[21];进入 1980~1990 年代以来,季国良、江灏等^[9 19]对那曲、拉萨和五道梁等地区进行了测定,发现 1982-08 到 1983-07 那曲为 0.041,拉萨为 0.040,而 4~10 月间平均也和上述值相同;1993-09 至 1994-08 五道梁地区为(值 0.043,其中 4~10 月约为 0.044,可见海北站地区的(值分布有较高的量值,与北京地区的测定结果^[8 22],以及河西地区的测定结果^[23]相比,也显得很高。这可能不仅与地区所处的地理环境条件有关,而且与随年代的推移,受人类活动影响加剧,对流层臭氧遭受破坏严重有关。已有的研究证实,青藏高原上空是臭氧分布的一低值区^[16 17],即“臭氧低谷”现象,这恰恰印证人类活动加剧对臭氧分布减少的可能,从而减少对 UV 的吸收,致使 UV 到达地表量在过去的近几年有增加的趋势。

一般来讲,纬度、经度不变的条件下, η 值将随海拔高度而增加,Matijevich 等^[24]曾对不同地区 UV 随海拔高度变化的研究表明,在智利边远山区,高度增加 1 km, UV 将增加 4%~10%,而在瑞士的阿尔卑斯山地区,高度增加 1 km, UV 增加 9%~23%。戴加洗等^[8]在进行 1976~1977 年青藏高原考察后研究证实,我国青藏高原 η 值明显高于东部地区。同样,在其他条件不变的条件下,随纬度增加,由于

太阳高度角将降低, η 值依日变化的情况将证实也出现降低的可能,在我国西部地区,由于工业化程度相对东部地区较弱,大气污染较轻,地区又远离海洋,空气干燥,水汽含量低,大气透明度大,空气清洁,近年来青藏高原为“臭氧低谷”区域等,对太阳短波辐射的吸收将减小,从而会导致较多的辐射易到达地表,致使 UV 占 E_g 的比例相应增加。

2.5 光合有效辐射 (PAR)

同样,海北站地区 PAR 与 E_g 一样表现有明显的日变化特点(图略)。早晚低,午后 13:00~14:00 (北京时下同)左右达最高,只是在不同季节所表现的瞬时最高数值有所不同。太阳高度角高(低)时, PAR 日瞬时大(小),最大可达 $370\ \text{W/m}^2$ 以上,基本出现于 13:00 到 14:00,对应日总量可达 $10\ \text{MJ/m}^2$ 以上。夏季较高的 PAR 对正值植物迅速生长,干物质积累非常有利。但不同天气背景下,将发生不同的变化趋势,表现出与散射辐射相关明显,有时不一定遵从单峰式的日变化规律。 PAR 在太阳总辐射 (E_g) 中所占的比例 (μ) 日变化比较平稳,日间在早晚日出日落前后相对稍高,而在 10:00~17:00 时间略低。证明 μ 在一日间有随时间变化而变化的可能。其日变化趋势与刘建栋等对林农复合地区的研究结果基本一致^[25]。

从 1、4、7、10 的 4 个月平均来看, μ 的月平均分别为 0.40、0.41、0.42 和 0.42,表现出变化平稳并在冷季稍低,证实 μ 也存在弱的季节变化。其结果与周允华等^[26]对中国各地区的研究有点相似,但量值稍低,如他对北京等 8 个地区 11 个测点研究表明,1 月、4 月、7 月和 10 月平均分别为 0.41、0.41、0.44 和 0.44。其中 1、4 月与海北站地区基本相同,但 7、10 月比海北站偏低 0.02。同时与季国良等^[27]对张掖地区的测定结果比较,也有大同小异的特点。但总体表现出祁连山海北地区(有较低的水平,年平均为 0.41,其中在冷季的 1~3 月可降到 0.40 以下,如 2 月仅为 0.385。一般情况下 η 值的变化与太阳高度角成一定的对数反比关系,即(值是随太阳高度角的增加而降低,这在周允华^[26]和季国良等^[27]对不同地区的研究中有所证实。

在图 1 看到,年内实际天气状况下各旬的 PAR 值随时间进程波动变化较大。与 E_g 变化一样,在 7 月最高 ($312\ 891\ \text{MJ/m}^2$),5 月次高 ($294\ 968\ \text{MJ/m}^2$);在 12 月和 1 月分别为 $142\ 453\ \text{MJ/m}^2$ 和 $153\ 194\ \text{MJ/m}^2$,是年内最低时期。年内总量达

$2\,576\,777\text{ MJ/m}^2$, 植物生长期的 5~9 月为 $1\,133\,965\text{ MJ/m}^2$, 是 E_g 的 0.413。

长久以来, 植物生理学家一般将总辐射的近 1/2 作为 PAR 的能量, 大多取为 0.44~0.50。提出估算模式有: $PAR = aE_g$, a 为折算系数。从海北站 1 a 资料观测证明, 这个 a 的取值 0.44 将明显偏高。从而作者对海北站提出对 PAR 的计算式有

$$PAR = -3\,8044 + 0.4177E_g$$

该直线回归方达极显著经验水平, 说明效果极好。即至少对祁连山北部地区的 PAR 可用该模拟方程来估算。

2.6 净辐射变化情况

近地层净辐射(辐射平衡)表征了大气、土壤间湍流交换的强弱, 在土壤-植被-大气连续体的能量转换过程中有着重要的作用, 是决定小气候形成的最基本的因素。净辐射(R_n)作为土壤-植被-大气系统的外部驱动能量, 主要以感热通量(H)、潜热通量(λE)的形式加热大气边界层底部, 也以部分能量以土壤热通量(G)的形式进入土壤, 以作为土壤增温的强迫能量, 同时植被层部分能量的储存也来自 R_n 能量, 但这部分能量极小(一般小于占 R_n 的 5%)而常被忽略。从而可构成下垫面热量平衡方程有

$$R_n - H - (E - G) = 0 \quad (7)$$

在海北矮嵩草草甸植被区, 观测到的 R_n 通量有较高的水平, 日变化也明显, 白天为正值, 瞬时最高可达 770 W/m^2 以上, 特别是植物生长期, 白天下垫面达到的净辐射能量较高。夜间为负值, 属净损失能量, 且变化平稳, 负值最大可为 7 W/m^2 以下, 但出现时间极不一致, 如 04-21 出现于 21:00-06:19 最低出现于 03:00。白天日变化与 E_g 的变化一致, 在夜间因受地表长波辐射的影响, 出现土壤热量向空气散射等, 其变化因时间、土壤湿度、季节温度变化等变化较为复杂。 R_n 在一日中两次通过零点的时间分别在早晨日出后的半小时左右和傍晚日落前的半小时左右。

从整个一年观测资料来看(图 1), 正向(日间) R_n 在植物生长起内的 7、8 月高, 分别为 $463\,691\text{ MJ/m}^2$ 和 $405\,809\text{ MJ/m}^2$, 而在冷季的 12 月、1 月低, 分别为 $143\,939\text{ MJ/m}^2$ 和 $148\,725\text{ MJ/m}^2$; 负向(夜间) R_n 绝对值在 11 月和 12 月高, 分别为 $93\,004\text{ MJ/m}^2$ 和 $91\,088\text{ MJ/m}^2$, 低值出现在暖季 6~9 月, 月平均为 $37\,278\text{ MJ/m}^2$, 其他月份均在 $50\,000\text{ MJ/}$

m^2 以上。表明在海北站地区白天地表受热快, 但在夜间释放热量也极为迅速。从整个年度来看, 年内总 R_n+ 为 $3\,255\,739\text{ MJ/m}^2$, 总 R_n- 为 $712\,789\text{ MJ/m}^2$, 期间总 R_n+ 明显大于总 R_n- , 若对 R_n+ 与 R_n- 作合计处理为 $2\,542\,950\text{ MJ/m}^2$, 年内 R_n 占 E_g 的 4%, 其中 R_n- 占 E_g 为的 52%, 也表明有 11% 的热量转换在地表进行。

3 小结

1 在海北站地区, 不同季节 E_g 的日变化有所不同。2000 年 1、4、7、10 月日瞬时最高分别可达 610 W/m^2 、 $1\,050\text{ W/m}^2$ 、 $1\,150\text{ W/m}^2$ 、 780 W/m^2 以上, 1 d 间呈现单峰式曲线变化过程。年内瞬时最大值接近太阳常数。年总量可达 $6\,278\,867\text{ MJ/m}^2$, 其中植物生长期的 5~9 月为 $3\,181\,215\text{ MJ/m}^2$ 。月最高值出现在 7 月, 月次高值在 5 月; 月最低值在 12 月。

各月 E_g 占理想总辐射的百分率与气象站测定的日照百分率变化趋势一致, 采用较常用计算实际总辐射的方法, 提出 E_g 的模拟估算式有: $E_g = E_{g0} (0.0897 + 0.9768 S/S_0)$ 。因 2000 年气候较为多年干燥, 致使年总辐射高于多年平均, 根据模拟方程对多年情况进行简单估算, 海北站地区年总辐射量平均约为 $6\,082\,849\text{ MJ/m}^2$ 更为确切。

2 E_r 日变化规律与 E_g 同步, 只是量值较小。 E_r 在 5 月由于降水较低, 空气干燥, 月总量最高; 年内 E_r 总量为 $1\,515\,139\text{ MJ/m}^2$, 其中植物生长期的 5~9 月为 $698\,021\text{ MJ/m}^2$ 。 A 的日变化在不同时期所表现的趋势似乎一致, 一般在早晚高, 中午前后低。日间为“U”型分布状况。年内 A 值的变化也表现出“U”型变化结构。2000-03 到 2001-02 年平均平均为 0.242, 在植物生长期内的 5~9 月 A 的平均为 0.219。

3 NIR 在 E_g 中占有较大的比例。年内 NIR 为 $3\,397\,404\text{ MJ/m}^2$, 占 E_g 的 54%。

4 在海北站地区, 因海拔较高 UV 所表现的量值较海拔低的区域高, 日变化与 E_g 变化同期。1 月日瞬时最大为 67 W/m^2 ; 7 月 UV 日瞬时最大可达 75 W/m^2 。年内 UV 总量为 $311\,242\text{ MJ/m}^2$, 植物生长期的 5~9 月为 $165\,955\text{ MJ/m}^2$ 。 η 值一日间中午最高在 0.050 以上, 最大达 0.079, 同时表现出上午较低, 而下午较高的现象。 η 的年平均为 0.048, 其中

植物生长期的 5~9 月为 0.052, 冷季 (10 月至翌年 4 月) 0.045。

5 同样, 海北站地区 PAR 与 E_g 一样日变化明显。日瞬时最大可达 370 W/m^2 以上, 对应日总量可达 10 MJ/m^2 以上。7 月最高 (312.891 MJ/m^2), 5 月次高 (294.968 MJ/m^2); 在 12 月和 1 月分别为 142.453 MJ/m^2 和 153.194 MJ/m^2 , 是年内最低时期。年内总量达 2576.777 MJ/m^2 。植物生长期的 5~9 月为 1133.965 MJ/m^2 , 从 1、4、7、10 的 4 个月平均来看, η 的月平均分别为 0.40、0.41、0.42 和 0.42, 表现出变化平稳并在冷季稍低, 证实 η 也存在弱的季节变化。海北站提出对 PAR 的计算式有: $PAR = -3.8044 + 0.417E_g$

6 观测到的 R_n 通量有较高的水平, 日变化明显, 白天为正值, 瞬时最高可达 770 W/m^2 以上, 特别是植物生长期, 白天下垫面达到的净辐射能量较高。夜间为负值, 负值最大可在 7 W/m^2 以下, 但出现时间极不一致。白天日变化与 E_g 的变化一致, 夜间因受地表长波辐射的影响, 出现土壤热量向空气散射等, 其变化因时间、土壤湿度、季节温度变化等变化较为复杂。 R_n 在一日中两次通过零点的时间分别在早晨日出后的半小时左右和傍晚日落前的半小时左右。

从整个 1 a 观测资料来看, 正向 (日间) R_n 在植物生长起内的 7、8 月高, 冷季 12 月、1 月低; 年内总 R_{n+} 为 3255.739 MJ/m^2 , 总 R_{n-} 为 712.789 MJ/m^2 , 期间总 R_{n+} 明显大于总 R_{n-} , 若对 R_{n+} 与 R_{n-} 作合计处理为 2542.950 MJ/m^2 , 年内 R_n 占 E_g 的 41%。

参考文献 (References)

- [1] Li Y ingnian, Zhao X inquan, Cao Guangn in, *et al*. The study of reflective radiation and surface albedo of alpine meadow vegetation [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10(1): 33~39 [李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸地区太阳总辐射、植被反射率的有关特征 [J]. 草地学报, 2002, 10(1): 33~39]
- [2] Li Y ingnian and Zhou Huakun. The features of photosynthetic active radiation (PAR) in Haibei alpine meadow area of Qilian mountain during the plant growing period [J]. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(1): 90~95 [李英年, 周华坤. 祁连山海北高寒草甸地区植物生长期的光合有效辐射特征 [J]. 高原气象, 2002, 21(1): 90~95]
- [3] Li Y ingnian, Wang Wenying, Zhao Liang, *et al*. The characteristics of ultraviolet radiation and its physiology effect on the plants in the area of Haibei alpine meadow of Qilian mountain [J]. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(6): 615~621 [李英年, 王文英, 赵亮, 等. 祁连山海北高寒草甸地区紫外辐射特征及其对植物生理作用的探讨 [J]. 高原气象, 2002, 21(6): 615~621]
- [4] Li Y ingnian, Zhao X inquan, Cao Guangn in, *et al*. Analysis of climate, vegetational productivity background and their correlation of Haibei Alpine meadow Ecosystem Research Station [J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(4): 558~567 [李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析 [J]. 高原气象, 2004, 23(4): 558~567]
- [5] Li Y ingnian, Zhao X inquan, Wang Q inxue, *et al*. The comparison studies of community biomass and environmental condition of five vegetational type in alpine meadow [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(3): 257~264 [李英年, 赵新全, 王勤学, 等. 高寒草甸五种植被类型生物量及环境条件的比较研究. 山地学报, 2003, 21(3): 257~264]
- [6] Jose P. Peikoto and Abraham H. Oort (by Wu Guoxiong, Liu Hui translated). *Physics of climate* [M]. Beijing: Science Press, 1995. 72~103, 172~190 [Jose P. Peikoto and Abraham H. Oort (吴国雄, 刘辉译). 气候物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995. 72~103, 172~190]
- [7] Jiang Jinan, Ji Guoliang. Radiation characterizes in Wudaoliang regions [J]. *Plateau Meteorology*, 1988, 7(2): 145~155 [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]
- [8] Bai Jianhui, Wang G engegen. The basic characteristics of the solar ultraviolet radiation over the Baijing district [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1993, 14(3): 245~250 [白建辉, 王庚辰. 北京地区太阳紫外辐射的基本特征 [J]. 太阳能学报, 1993, 14(3): 245~250]
- [9] Ji Guoliang. Radiation and climate in Qinghai Tibetan Plateau from 1982 August to 1983 July [J]. *Plateau Meteorology*, 1985, 4(4): 10~20 [季国良. 1982年 8 月~1983 年 7 月青藏高原地区的辐射与气候 [J]. 高原气象, 1985, 4(4): 10~20]
- [10] Chen Youyu. The radiation and its annual variations in Naqu regions of Qinghai Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 1985, 4(4): 50~66 [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]
- [11] Wu Duming, Chen Wanlong, Shen Juecheng, *et al*. Microclimate and Agricultural microclimate [M]. Beijing: Agriculture Publication, 1991, 14~18 [翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成, 等. 小气候和农田小气候 [M]. 北京: 农业出版社, 1991. 14~18]
- [12] Wu A isheng and Zhongqiang. Relationships between global radiation, surface albedo and solar elevation angle for several underlying surfaces in the HEHE experimental [J]. *Plateau Meteorology*, 1993, 12(2): 147~154 [吴艾生, 钟强. 黑河实验区若干下垫面总辐射、地表反射率与太阳高度角的关系 [J]. 高原气象, 1993, 12(2): 147~154]
- [13] Ji Guoliang, Zou jiling. The seasonal variation of solar radiation budget over oases and desert in arid region [J]. *Plateau Meteorology*, 1993, 12(3): 323~329 [季国良, 邹基玲. 干旱地区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化 [J]. 高原气象, 1994, 13(3): 323~329]
- [14] Wu A isheng and Zhong Q iang. Seasonal variation of surface albedo and vegetation index over Hahe experimental area [J]. *Plateau Meteorology*, 1992, 11(4): 440~450 [吴艾生, 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]
- [15] Yuan Fumao. Radiation characterizes on Gaize regions of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 1985, 4(4): 36~ 49[袁福茂. 青藏高原改则地区辐射特征 [J]. 高原气象, 1985, 4(4): 36~ 49]
- [16] Zhou Xiuji, Luo Chao, Li Weiqi *et al*. The variations of total ozone in China and exceptionally low center of Qinghai-Tibetan Plateau [A]. In: China atmospheric ozone changes and its effects on climate (1) [C]. Science Press, Beijing, 1996, 232~ 238[周秀骥, 罗超, 李维奇, 等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原异常低值中心 [A]. 见: 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 (1) [C]. 北京: 科学出版社, 1996, 232~ 238]
- [17] Guo Song and Zhou Xiuji. Study on atmospheric ozone vertical profile in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39, 17~ 26 郭松, 周秀骥. 青藏高原大气臭氧垂直廓线的观测研究 [J]. 科学通报, 1994, 39, 17~ 26
- [18] Shen Zhibao, Zuo Hongchao. The study on the variation of the surface albedo over the Qinghai-Xizang plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 1993, 12(3): 294~ 301[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]
- [19] Ji Guoliang and Chen Youyu. Ultraviolet radiation in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 1985, 4(4): 112~ 121[季国良, 陈有虞. 青藏高原的紫外辐射 [J]. 高原气象, 1985, 4(4): 112~ 121]
- [20] Dai Jiaxi, Li Pengjie, Su Hongde. Research on radiation and heat resources in Tanggula Mountains regions [A]. In: Contributions on Qinghai-Tibetan Plateau meteorology [C]. Science Press, 1997, 176 ~ 193[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]. 科学出版社, 1977, 176~ 193]
- [21] Jiang hao and Ji Guoliang. Solar ultraviolet radiation in Wudaoliang regions [J]. *Plateau Meteorology*, 1996, 15(2): 141~ 146[江灏, 季国良. 五道梁地区的太阳紫外辐射 [J]. 高原气象, 1996, 15(2): 141~ 146]
- [22] Zhou Yunhua. Solar ultraviolet radiation in China [J]. *Acta Geographical Sinica*, 1986, 41(2): 132~ 143[周允华. 中国地区的太阳紫外辐射. 地理学报, 1986, 41(2): 132~ 143]
- [23] Jiang Hao, Ji Guoliang, Lü Lanzhi. Solar ultraviolet radiation in HEFE oasis regions [J]. *Plateau Meteorology*, 1994, 13(3): 346 ~ 352[江灏, 季国良, 吕兰芝. HEFE绿洲区的太阳紫外辐射 [J]. 高原气象, 1994, 13(3): 346~ 352]
- [24] Madronich S, R LM ckenzie, M M Cakwell and L O Björn. Change in ultraviolet radiation reaching the earth's surface [J]. *Ambio*, 1995, 24(3): 143~ 152
- [25] Liu Jiandong, Fu Baopu, Lu Qiyaq *et al*. Spectral profiling in sunny day in Agroforestry complex ecosystems [J]. *China Agricultural Meteorology*, 1997, 18(3): 8~ 10[刘建栋, 傅抱璞, 卢其尧, 等. 林农复合生态系统晴天光谱特征分析 [J]. 中国农业气象, 1997, 18(3): 8~ 10]
- [26] Zhou Yunhua, Xiang Yueqin, Shan Fuzhi. Climate research on photosynthetic activity radiation (PAR) [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 1984, 42(4): 387~ 396[周允华, 项月琴, 单福芝. 光合有效辐射 (PAR) 的气候学研究 [J]. 气象学报, 1984, 42(4): 387~ 396]
- [27] Ji guoliang, Ma Xiaoyan, Zou Jiling *et al*. Characteristics of the photosynthetically active radiation over Zhangye region [J]. *Plateau Meteorology*, 1993, 12(2): 141~ 146[季国良, 马晓燕, 邹基玲, 等. 张掖地区的光合有效辐射特征 [J]. 高原气象, 1993, 12(2): 141~ 146]

The Climate Characteristics of Radiation of Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station

LI Yingnian, ZAO Liang, Xu Shixiao, ZHAO Xinquan, ZHOU Huakun, GU Song

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

Abstract The radiation and its changing pattern of Haibei Station were analyzed by the observational data from March, 2000 to February, 2001, which will provide the scientific proofs for the research of material cycle, energy flow, forming mechanism of grassland productivity and so on. The results showed as below. *E_r*, *UV*, *PAR*, *NIR* and *En* reached to 6 278 867 MJ/m²; 1 515 139 MJ/m²; 311 242 MJ/m²; 2 576 777 MJ/m²; 3 397. 404 MJ/m² and 2 542 950 MJ/m², respectively in a year with the obvious daily and annual change. In the plant growing season from May to September, *E_r*, *UV*, *PAR*, *NIR* and *En* reached to 3 181 215 MJ/m²; 698 021 MJ/m²; 165 955 MJ/m²; 1 133 965 MJ/m²; 1 673 871 MJ/m² and 1 668 805 MJ/m², respectively. The proportions of *E_r*, *UV*, *PAR*, *NIR* in *E_g* were 0.242, 0.048, 0.410, 0.540 and 0.410, respectively in a year while those were 0.219, 0.052, 0.413, 0.528 and 0.527, respectively in plant growing season. The simulated equations on *E_g* and *PAR* were as below: $E_g = E_{g0} (0.0897 + 0.9768 S_0 / S_0)$, $PAR = -3.8044 + 0.4177 E_g$. They had a good simulating significance and we can estimate them by general data of meteorological observation.

Key words Alpine meadow; ecosystem; radiation; climate characteristics