

文章编号: 1000-0240(2006)04-0549-07

植物生长季海北高寒湿地辐射收支特征

李英年¹, 赵亮¹, 张法伟^{1,2}, 徐世晓¹, 赵新全¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 依据祁连山海北高寒湿地植物生长期观测资料, 分析了区域辐射收支情况及其变化特征。结果表明: 祁连山海北高寒湿地有较强的太阳总辐射(DR), 但地表反射辐射(UR)、地面有效辐射(ELR)较低; 地表长波辐射(ULR)、大气逆辐射(DLR)、净辐射(R_n)均较高, 且具有明显的日、季节变化。植物生长期5~9月的日变化振幅 $DR > R_n > UR > ULR > DLR > ELR$, 其总量表现出 $ULR > DLR > DR > R_n > UR > ELR$, 分别达 4650.6、4225.5、3058.8、2156.2、477.6 和 425.1 $MJ \cdot m^{-2}$ 。从月际分布来看, ULR 、 DLR 、 DR 最高出现在7月, R_n 出现在6月, UR 出现在5月, ELR 出现在8月, 分别为 980.3、913.1、721.5、554.9、112.1 和 127.4 $MJ \cdot m^{-2}$ 。

关键词: 植物生长期; 祁连山海北地区; 高寒湿地; 辐射收支

中图分类号: P422.4 **文献标识码:** A

青藏高原的加热作用以及对东亚乃至全球天气气候的影响备受大气科学界的关注^[1-3], 20世纪70年代以来, 国内外气象学家就不断地致力于这方面的研究。但青藏高原地形结构复杂, 其各地的动力和热力效应有所不同。因此, 分析不同地区不同植被类型分布区大气边界层的辐射能量收支显得尤为重要。

在青藏高原高寒草甸生态系统中, 太阳短波总辐射(DR), 以及下垫面反射辐射(UR)、地面长波辐射(ULR)、大气逆辐射(DLR)等不仅反映了地表对太阳辐射能吸收的多少, 而且在生态系统能量流动及物质循环过程中有着极为重要的作用。然而, 青藏高原具有丰富多样的高寒草甸生态系统, 过去的研究大多在高寒草甸、高寒荒漠、高寒草原进行^[4-8], 较少涉及到高寒湿地^[9]。2002年9月开始, 以中国生态系统研究网络(CERN)为依托, 以微气象学涡度相关技术(eddy covariance technique)为主要手段的中国陆地生态系统通量观测研究网络(China FLUX)启动, 在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(以下简称海北站)高寒湿地

架设涡度相关观测技术系统一套, 在进行碳通量、水热通量等观测的同时, 亦进行常规气象要素的观测, 从而对青藏高原高寒湿地的辐射能量收支状况可进行连续观测和分析。这不仅可以认识高寒湿地能量分配过程, 找出局地小气候形成的机制问题及其分布规律, 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, 揭示系统内部相互影响机制及地气相互作用, 以及辐射收支对全球气候变化的响应等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 自然概况

海北站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°19' E、37°37' N, 海拔 3240 m。据海北站气象观测资料, 区域近 20 a 来多年平均气温为 -1.6℃, 降水量约 560.0 mm, 年日照时间可达 2467.7 h。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。暖季湿润、短暂、凉爽, 而冷季干燥、漫长、寒冷^[10]。

收稿日期: 2006-01-03; 修订日期: 2006-03-10

基金项目: 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“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”项目; 中日合作“亚太地区环境创新战略计划项目(APEIS)”资助

作者简介: 李英年(1962—), 男, 青海乐都人, 高级工程师, 1987年毕业于北京气象学院, 主要从事生物气象研究工作。

E-mail: ynli@nwipb.ac.cn

高寒湿地主要分布在土壤通透性差的河畔、湖滨、盆地,以及坡麓潜水溢出和高山冰雪下缘等地带,也多分布在岛状冻土的边缘地带^[9, 11-12]。海北高寒湿地所处区域地表除部分面积极小的岛状草丘外,大部分区域被积水长期所覆盖。调查表明^[13],植被以寒冷湿生、多年生地下芽草本植物帕米尔苔草(*Carex pamirensis* Marsh)为建群种,湿地边缘以藏嵩草(*Kobresia tibetica*)草甸为建群种的典型高寒湿地。植物群落生长茂盛,植被分布均匀,外貌整齐,伴生种较少,总盖度达98%左右^[9]。长期的生物气候综合影响下,发育着典型的沼泽土,泥炭层厚度在0.2~2.0 m。中央区植被高、种类组成少。边缘区植被高度低,物种比中央带丰富。群落主要有25种植物组成。草群高为10~50 cm不等。除建群种的优势种为帕米尔苔草外,次优势种有华扁穗草(*Blymus sinocompressus*)、藏嵩草,伴生种有黑褐苔草(*Carex atrofusca*)、黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)、杉叶藻(*Hippuris vulgaris*)、斑唇马先蒿(*Pedicularis longiflora* var. *tubiformis*)、祁连漳芽菜(*Swertia przewalskii*)等。在边缘带还有大量的星状风毛菊(*Saussurea stilla*)、青藏苔草(*Carex moorcroft*),更远的(约300 m以外)为矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸植被类型。由于气候季节变化,海北高寒湿地在不同季节其外表景观差异较大。春季冰雪融化后湿地地表处于全年最干燥时期,且上年度残留枯草较多,该时期植物虽进入萌动发芽初期,但多在枯黄植被下面才能见到刚返青的绿色幼苗。夏季到秋季阶段,上游水补给充分,湿地地表长久积水,植物生长繁茂,积水多,牲畜难以涉进,湿地基本处于不放牧时期。秋季后期到冬季阶段,为全年放牧最重(多)时期,但植物粗纤维高,适口性差,被采食的植物量有限,终久还有大量的枯黄牧草留存于地表并保持到次年夏季,该期湿地地表水结冰,并随时间的推移而加厚,直至来年。

1.2 研究材料

辐射及各分光辐射观测由中国通量网(China Flux)建设并投入的涡度相关观测系统在该实验地设置的常规气象辐射观测仪进行,其辐射表有太阳短波总辐射表(CM11, Kipp & Zonen, USA),地面长波辐射表(CNR-1, Kipp & Zonen, USA),安装高度离植被冠面上方1.5 m处,其中净辐射即为上述上下长短波四表一体的计算值。本文所采用的研究资料为2004年度植物生长季5~9月。观测采用

北京时间,以0 00划分日界。数据系自动采集(采集频率为0.5 Hz),经系统处理后输出30 min平均值。

2 结果与分析

2.1 植物生长季高寒湿地的 DR 、 UR 、 R_n 的日、月变化

为了比较植物在生长过程中不同主要时期,以及不同天气类型状况下高寒湿地辐射收支的日变化,图1(a~e)选择了5~9月每月月中14~18日 DR 、 UR 、 DLR 、 ULR 以及 R_n 日变化。同时也给出了5~9月各月月平均的日变化情况(图1f)。所选择的各月5 d中,5月基本在植物返青时期,有降水产生时地表易出现积雪,早晚地表水也易结冰(霜),虽植物进入返青阶段,但植芽多被枯黄植物所覆盖;6月为植物进入强度生长的初期,植株可达5~8 cm高度,地表积水暂多;7月为植物强度生长期,上年度残留枯黄植物减少,下垫面除有积水外,多为绿色的植被所覆盖;8月植物发育成熟,生长处于停止初期,植稍枯黄明显;9月植物停止生长,因受霜冻等环境因素影响,植物冠面枯黄严重,而且地表积水早晚出现结冰。

图1(a~e)看到,在无降水或少云的大多数天气状况下, DR 日瞬时(30 min平均)最高值超过 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,5~8月日瞬时超过 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的很多见,如:5月17日13 30瞬时为 $1140 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,仅比太阳常数^[14]($1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)小 $220 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。较大值的出现常在天空有一定中高云存在,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,而且也易接受较高的云的散射照射。另外在完全为阴天的状况下视云层厚薄不同,瞬时最高不一致。瞬时最高值与藏北高原地区的测定结果^[15]($1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)基本接近。同时表明,植物生长期内 DR 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。一日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,太阳高度角高的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。在7月虽然太阳高度角较高,但该月降水丰富,月降水量达104.4 mm,是年内月降水最高时期,其 DR 瞬时最大值也较低。

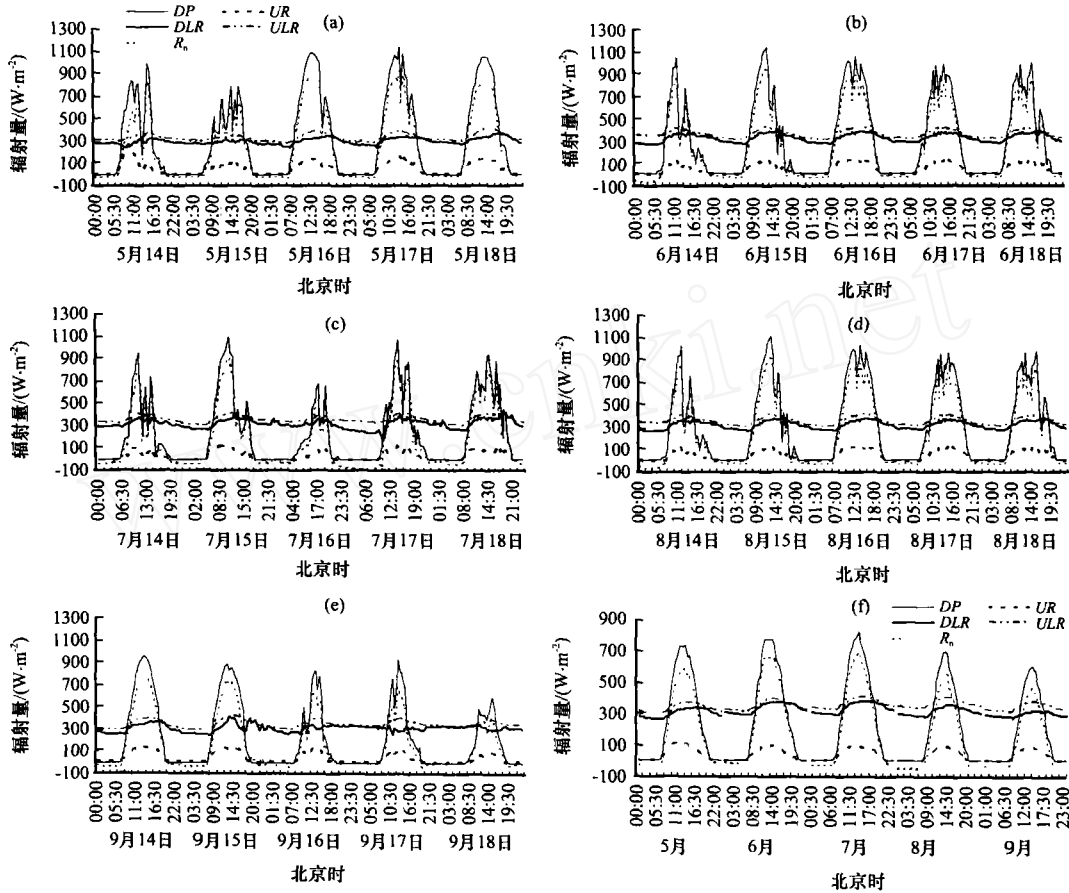


图 1 海北高寒湿地太阳总辐射(UR)、植被反射辐射(DR)、地表长波辐射(DLR)、大气逆辐射(ULR)以及净辐射(R_n)日变化状况(其中(f)为月平均日变化)

Fig. 1 Diurnal variation of the total global solar radiation(UR), the vegetation reflected radiation(DR), the long-wave radiation (DLR), the atmospheric inversion radiation (ULR) and net radiation (R_n) of alpine wetland in Haibei (Graph f showed the monthly average diurnal variation)

UR 日变化规律与 DR 同步，只是由于高寒湿地地表长久积水，植被茂密，下垫面性质决定了其 UR 较小。一般日瞬时最高值除在 5 月上中旬前达 $250 \sim 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 外(图 1)，其它时间，特别是 6~8 月初很少超过 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，如：5 月 14 日因前日有少量降雪，加之湿地冬季结冰刚融化不久，地表积水浅薄，部分区域地表裸露，土温低，有少量降水产生便可形成地面积雪，而且不易融化，导致 UR 相对较高， UR 的日瞬时最高在上午 10:00 达 $268 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ；在 6 月 15 日，7 月 15 日，8 月 16 日中午 13:00 到 14:00， UR 的日瞬时最高分别为 $136 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $130 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $136 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。9 月虽天气转冷，时有降雪过程发生，但因土壤温度仍较高，降雪可及时融化，地表积水深厚， UR 的日瞬时最高也多在 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以内，如晴天状况下的 9 月 15 日， UR 的日瞬时最高仅为 $125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

从海北高寒湿地 DR 、 UR 月平均日变化情况看到(图 1f)，植物生长期的 5~9 月各月 DR 和 UR 月平均日瞬时最高在 $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上和 $90 \sim 120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间， DR 日瞬时最高值出现时间均在 13:30， UR 因受季节不同下垫面性质不同的影响，各月月平均日最高出现时间差异较大。 DR 日瞬时表现出 7 月最大，月平均为 $821.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，6 月、5 月、8 月、10 月依次减小，10 月平均日瞬时最高为 $610.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。研究地点地方时与北京时间相差 75 min，因而 DR 月平均日瞬时最高出现在 13:30 是可以理解的。 UR 的月平均日变化过程中，表现出日瞬时在 5 月最大，为 $119.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，以后随时间进程因植被盖度加大依次降低，9 月日平均瞬时最高仅为 $90.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

统计植物生长期 5~9 月间各月的 DR 、 UR 合计值列表 1。表 1 可以看到，海北高寒湿地 DR 的

表 1 植物生长季海北高寒湿地太阳总辐射(UR)、植被反射辐射(DR)、地面长波有效辐射(ELR)、地表长波辐射(DLR)、大气逆辐射(ULR)以及净辐射(R_n)月际分布

Table 1 Monthly variations of the total global solar radiation (UR), the vegetation reflected radiation (DR), the surface long-wave effective radiation (ELR), the long-wave radiation (DLR), the atmospheric inversion radiation (ULR) and net radiation (R_n) of alpine swamp in the Northern Qinghai during growing season

月份	DR /日均	UR /日均	DLR /日均	ULR /日均	R_n /日均	ELR /日均
5	659.0/21.3	112.1/3.6	812.7/26.2	893.5/28.8	466.1/15.0	80.8/2.6
6	687.1/22.9	95.5/3.2	873.7/29.1	910.4/30.3	554.9/18.5	36.7/1.2
7	721.5/2	3.3106.1/3.4	913.1/2	9.5980.3/3	1.6548.2/1	7.767.2/2.2
8	538.0/17.4	84.8/2.7	852.0/27.597	9.7/31.6	325.6/10.5	127.7/4.1
9	453.2/15.1	79.1/2.6	774.0/2	5.8886.7/2	9.6261.4/8.7	112.7/3.8
合计	3058.8/20.0	477.6/3.1	4225.5/2	7.64650.6/30.4	2156.2/14.1	425.1/2.8

月总量 7 月最高, 为 $721.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 5 月和 6 月分别为 $687.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $659.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 仅次于 7 月, 8 月和 9 月降低迅速, 9 月为 $453.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$. 这是因为 5~7 月太阳高度角最高, 同时青藏高原大气干洁, 透明度好, 地表接受辐射量大, 6 月、7 月虽然降水增多, 天空多阴云, 太阳辐射在一定程度上受到大气云层的阻隔影响, 但该时期日照时间长, 天空云系多为对流发展云, 云来云往变化急速, 而且以“环山云”占主导地位, 太阳散射辐射强, 导致 5~7 月的 DR 较大. 8 月和 9 月不仅因受大气云层的阻挡, 而且太阳高度角也变得较低, 致使 DR 也较低.

海北高寒湿地 UR 在 5 月由于降水少, 地表土温低, 易有积雪, 未被家畜采食的枯黄牧草堆积深厚, 空气干燥, 地表水浅薄, 部分地段甚至裸露, 造成月总量最高(表 1), 为 $112.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 日平均为 $3.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 其次在 7 月因太阳高度角高, 易接受较大的总辐射, 使 UR 达次高值, 为 $106.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 日平均为 $3.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 6 月也表现较高(日平均为 $3.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 8 月以后降低明显, 太阳高度角低的 9 月日平均为 $2.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$.

从 5~9 月合计总量来看, 海北高寒湿地 DR 达 $3058.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 而 UR 月间总量为 $477.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, UR 比同地区的矮嵩草甸^[16]低的多.

2.2 植物生长季 DLR 、 ULR 及地面长波有效辐射 (ELR) 的日、月变化

地表面及大气在吸收太阳短波辐射的同时, 其本身也以长波辐射的形式向大气和地下输送能量, 从而间接地将太阳短波辐射能转变为热能使近地面空气温度得以提高. 前面所讨论的是以太阳短波辐射能为主到达地表面的能量收支状况, 而对于近地

层来讲, 以长波辐射为主. 在地表净辐射能量收支过程中, 长波辐射起着决定性的作用. 因而, 对 DLR 、 ULR 及 ELR 的分析, 也是最基本最有意义的.

同样以选择的 5~9 月每月中 14~18 日进行个例(图 1a~e)以及月平均(图 1f)日变化分析表明, 海北高寒湿地植物生长期的 5~9 月, 不论是相对较冷的 5、9 月, 还是温度较高的 7 月, 少云或晴天下 DLR 的日瞬时最高一般均在 $330 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上, 日瞬时最低很少降低到 $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 日最低值常出现在气温最低的日出前后, 约在北京时间 06:00 左右, 只是随季节日出时间不同而略有一定的时间差异. 同时也可以看到, 其日瞬时最高值在整个生长季变化基本一致, 一般出现在北京时的下午 16:30~17:00 之间, 其量值很少超过 $390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 但 5~9 月的不同月份, 所表现数值差异较日瞬时最低明显, 一般 5 月日瞬时最高在 $350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 6 月在 $360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右. 7 月因温度最高而有所升高, 可出现在 $360 \sim 390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间.

ULR 的日瞬时最高可达 $400 \sim 420 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, ULR 日瞬时最高出现时间等与 DLR 的变化非常一致, 只是量值高于 DLR , 如 7 月平均日瞬时最高和最低分别为 $410.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $327.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 比 DLR 平均日瞬时最高和最低分别高 $24.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $36.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 同时 ULR 和 DLR 的日变化过程中, ULR 的日变化振幅大于 DLR .

观测表明(图 1f), DLR 、 ULR 的月平均日变化明显, 但较上述短波辐射的变化幅度明显减弱, 变化相对平稳. 植物生长期的 5~9 月, 二者月平均日变化在 $260 \sim 385 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $310 \sim 415 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间. 二者日平均瞬时最高出现在 7 月, 其它月份

依据离 7 月提前或滞后日瞬时最高逐渐降低。统计表明(表 1)，在植物生长期的 5~9 月，地表 ULR 和 DLR 的合计分别为 $4650.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4225.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

为了分析地面长波有效辐射 (ELR) 的日变化情况，图 2 绘出了 5~9 月 ELR 各月平均日变化。可以看到，在植物生长季，海北高寒湿地的 ELR 日变化过程中，一日间似乎表现二个高值区，较为明显的高值在日出前后的 8:00 左右，其次在中午前后也出现一高值区域。日落前后的 20:00 为日间最低，上午 10:00 左右出现相对较低的低值区。这可能因湿地地表有积水，土壤及水体热容量大，所储存的热量维持时间长，具有一定的滞后性有关。其内在机制问题有待进一步观测和研究。

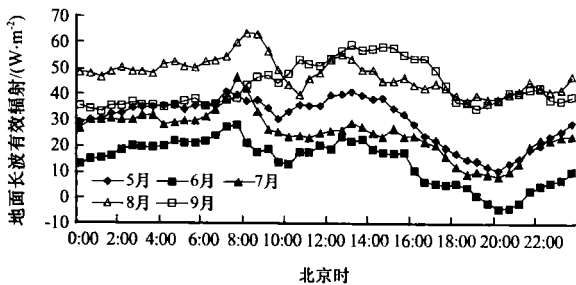


图 2 高寒湿地地表长波有效辐射的日变化

Fig. 2 Diurnal variations of the surface long-wave effective radiation of alpine wetland

由表 1 看到，高寒湿地在植物生长期内 ELR 具有明显的月变化， ELR 最高在 8 月 ($127.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)、最低在 6 月 ($36.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)，这也是由于湿地水体积水明显，土壤潮湿，土体热容量大，而且当环境温度下降后地温仍保持较高的原因所致，5~9 月总量为 $425.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.3 植物生长期高寒湿地下垫面净辐射收支通量 (R_n) 的日、月变化情况

某地地面的净辐射通量收支可以写为：

$$R_n = DR - ULR - UR + DLR$$

在图 1 中已给出了海北高寒湿地 R_n 的日变化情况， R_n 的变化基本与 DR 一致，日平均瞬时最高的 7 月为 $699.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，9 月为 $462.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可以看到，海北高寒草甸地区净辐射通量基本在早晨 8:00~9:00 到傍晚的 18:00 左右为正值，长达 9~10 h，表明该阶段地表面净得到热量，地表处于吸热阶段，受太阳辐射的影响，随时间进程变化剧烈，上午上升与下午下降均很迅速。随季节不

同地表吸热有所不同，如 6 月离夏至日较近的 18 日，白天得到热量最为强烈，最高可达 $499 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (14:00)；9 月 5 日地表得到热量较 6 月 18 日少，最高在 12:00，为 $328 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ；而 4 月 27 日得到热量最低，日最高在 12:00，仅为 $222 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

区域净损失热量时间约在傍晚 18:00~次日清晨 8:00，量值小但维持时间长，地表放热时间长达 14h 左右。植物生长不同时期，变化趋势基本一致，数值差异较小，而且随时间变化也较为平稳，无明显低值谷区出现，如 20:00 至次日 06:00 净损失热量一般为 $108 \sim 158 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。有趣的是日间得到热量强烈时，夜间则净损失热量也较大，白天得到热量较少时，夜间则净损失热量也较小。

从植物生长期的 5~9 月来看，其日间正向净辐射与负向净辐射之和为 $2156.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

地表净辐射的日、季节变化是太阳总辐射、地面有效辐射及地表反射辐射三者的综合结合，因而具有明显的日、季节变化。季国良等^[15]认为，对于青藏高原地区，地表净辐射的季节变化主要是受太阳总辐射的季节变化所控制，但对于半湿润地区的海北站地区来讲，这里降水较为丰富，气温日较差大，早晚温度时常处于 0 左右，致使地表常出现凝结水现象，可造成较大的地表反射率，因而也是影响反射率的重要因子之一。

3 结论

(1) 海北站高寒湿地太阳总辐射日瞬时超过 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的也很多见，常出现在天空有云，但不直接阻挡太阳光线的 13:00~14:00，最高可达 $1140 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，植物生长期 7 月最高，为 $721.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，9 月最低，为 $453.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，5~9 月 DR 达 $3058.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(2) UR 日变化规律与 DR 同步，只是由于高寒湿地地表长久积水，植被茂密，导致 UR 较小，日瞬时最高值除在 5 月上中旬因土温低，易有积雪，造成 UR 较大(可达 $250 \sim 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)外，其它时间，特别是 6~8 月很少超过 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。植物生长期的 5 月最大(为 $112.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)，9 月 UR 月合计只为 $79.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，5~9 月合计为 $477.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(3) 海北高寒湿地 DLR 、 ULR 均较高，植物生长期的 5~9 月，二者月平均日变化在 $260 \sim 385 \text{ W}$

$\cdot \text{m}^2$ 和 $310 \sim 415 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 之间. 二者日平均瞬时最高及其月累计最高出现在 7 月,其他月份依据离 7 月提前或滞后逐渐降低. 日变化明显,但较 DR 和 UD 相对平稳,5~9 月, ULR 和 DLR 的合计分别为 $4650.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4225.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$.

(4) 植物生长期高寒湿地 ELR 具有明显的月变化, ELR 最高在 8 月($127.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)、最低在 6 月($36.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$),这也是由于湿地水体积水明显,土壤潮湿,土体热容量大,而且当环境温度下降后地温仍保持较高的原因所致,5~9 月总量为 $425.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$.

(5) 与 DU 一样 R_n 日变化明显,在早晨的 8 00~9 00 到傍晚的 18 00 左右为正值,长达 9~10 h,日瞬时最高可达 $499.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;区域净损失热量时间约在傍晚 18 00~次日清晨 8 00,量值小但维持时间长,地表放热时间长达 14 h 左右.净损失热量一般为 $108 \sim 158 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间.从 5~9 月来看,其日间正向净辐射与负向净辐射之和为 $2156.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,地表获得热量.

参考文献(References):

- [1] Kou H L, Qian YF. Influence of the Tibetan Plateau on cumulative and diurnal changes of weather and climate in summer [J]. Mon Wea., 1981, **109**: 2337 - 2356.
- [2] Ye Duzheng, Gao Youxi. Meteorology of Qinghai-Tibetan Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1979: 1 - 39. [叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1 - 39.]
- [3] Ye Duzheng, Gao Youxi. Meteorology of Qinghai - Tibet Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1979: 14 - 89. [章基嘉, 朱抱真, 朱福康, 等. 青藏高原气象学进展[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 14 - 89.]
- [4] Ma Yaoming, Osamu Tsukamoto, Wu Xiaoming, et al. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, **24**(5): 715 - 722. [马耀民, 塚本修, 吴晓鸣, 等. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征[J]. 大气科学, 2000, **24**(5): 715 - 722.]
- [5] Zhang Xianzhou, Wang Huimin, Zhang Yiguang. A study on Radiation budget of the winter wheat field in Tibet Plateau [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1997, **8**(2): 236 - 241. [张宪洲, 王辉民, 张谊光. 青藏高原冬小麦田辐射能流收支的初步研究[J]. 应用气象学报, 1997, **8**(2): 236 - 241.]
- [6] Qian Zeyu, Hu Zeyong, Du Ping, et al. Comparison and analysis of the climatological features of radiation balance between the grassy marshland surface of north of the Tibetan plateau and the desert in HEIFE[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, **24**(4): 453 - 459. [钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 等. 藏北高原典型草甸下垫面与 HEIFE 沙漠区辐射平衡气候学特征对比分析[J]. 太阳能学报, 2003, **24**(4): 453 - 459.]
- [7] Li Yingnian. The radiation characters of suns short wave at Haibei alpine area Qilian Mountain during plant growing season [J]. Acta Agrestia Sinica, 2001, **9**(1): 58 - 63. [李英年. 海北高寒草甸植被在生长期辐射能量收支探讨[J]. 草地学报, 2001, **9**(1): 58 - 63.]
- [8] Ma Weiqiang, Ma Yaoming, Hu Zeyong, et al. Analyses on surface radiation budget in northern Tibetan plateau [J]. Plateau Meteorology, 2004, **23**(3): 348 - 352. [马伟强, 马耀民, 胡泽勇, 等. 藏北高原地面辐射收支的初步分析[J]. 高原气象, 2004, **23**(3): 348 - 352.]
- [9] Wang Qiji, Zhou Xingmin, Shen Zhenxi, et al. The structure of plant community and utilization in alpine Kobresia tibetica swamp meadow. [C] // Alpine Meadow Ecosystem, 4. Beijing: Science Press, 1995: 91 - 100. [王启基, 周兴民, 沈振西, 等. 高寒藏嵩草沼泽化草甸植物群落结构及其利用[C]// 高寒草甸生态系统, 第 4 集. 北京: 科学出版社, 1995: 91 - 100.]
- [10] Li Yingnian, Zhao Xinquan, Cao Guangmin, 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.]
- [11] Yin Kangqian, Ni Jinren. Review of wetland studies [J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, **18**(5): 539 - 546. [殷康前, 倪晋仁. 湿地研究综述[J]. 生态学报, 1998, **18**(5): 539 - 546.]
- [12] Chen Guichen, Huang Zhiwei, Lu Xuefeng, et al. Characteristics of wetland and its conservation in the Qinghai Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(3): 254 - 259. [陈桂琛, 黄志伟, 卢学峰, 等. 青海高原湿地特征及其保护[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 254 - 259.]
- [13] Li Yingnian, Zhao Liang, Xu Shixiao, et al. Plant community structure and ecological characteristics of alpine wetland at north area of Qinghai among Qilian Mountain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(1): 76 - 84. [李英年, 赵亮, 徐世晓, 等. 祁连山海北高寒湿地植物群落结构及生态特征. 冰川冻土[J]. 2006, **28**(1): 76 - 84.]
- [14] Peixoto J P, Oort A H. Physics of Climate [M]. New York: Springer - Verlag, 1992.
- [15] Ji Guoliang; Lu Lanzhi; Zou Jiling. The seasonal variation of surface radiation energy budget over Northern Tibetan Plateau [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica A, 1995, **16**(4): 340 - 346. [季国良, 吕兰芝, 邹基玲. 藏北高原太阳辐射能收支的季节变化[J]. 太阳能学报, 1995, **16**(4): 340 - 346.]
- [16] Li Yingnian, Zhao Xinquan, Cao Guangmin, 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.]

Characteristics of Radiation Balance on the Alpine Wetland in Haibei Prefecture of the Qilian Mountains in Growing Season

LI Ying-nian¹, ZHAO Liang¹, ZHANG Fa-wei^{1,2}, XU Shi-xiao¹, ZHAO Xin-quan¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining Qinghai 810008, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, radiation balance and changing characteristics on alpine wetland in Haibei Prefecture of the Qilian Mountains were analyzed according to long-term observation data in growing season. The results showed that there were higher total global solar radiation (DR), lower surface reflected radiation (UR) and lower surface effective radiation for the alpine wetland, as well as higher long-wave radiation (DLR), atmospheric inversion radiation (ULR) and net radiation (R_n). Their diurnal and seasonal variations were pronounced. As regards the diurnal variation

during growing season (from May to September), the order was $DR > R_n > UR > ULR > DLR > ELR$, however, as regards the total quantity, the order was $ULR > DLR > DR > R_n > UR > ELR$, with the values of 4650.6, 4225.5, 3058.8, 2156.2, 477.62 and 425.1 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. In light of monthly variations, the month maxima of ULR , DLR and DR were in July (950.1 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); those of R_n , UR and ELR were in June, May and August. The values of ULR , DLR , DR , R_n , UR and ELR were 980.3, 913.1, 721.5, 554.9, 112.1 and 127.4 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively.

Key words: growing season; Haibei Prefecture in the Qilian Mountains; alpine wetland; radiation balance