

两种高寒植被长波辐射的气候学特征及比较*

宋成刚^{1,2}, 张法伟¹, 王勤学³, 杜明远⁴, 赵亮¹, 李英年^{1**}

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

3. 日本国立环境研究所, 筑波 3058506 4. 日本农林环境技术研究所, 筑波 3058604)

摘要: 地球边界层热量来源是地表吸收太阳短波辐射后再以长波辐射形式加热的结果, 而边界层生物活动与地表热量息息相关, 讨论长波辐射的变化特征对生态系统的物质流动及能量交换具有重要意义。以 2003 年对高寒矮嵩草草甸、金露梅灌丛两种植被类型观测的资料, 比较分析了两种植被类型地面长波辐射 (ULR)、大气逆辐射 (DLR) 以及地面有效长波辐射 (ELR) 的变化特征。结果表明, 高寒矮嵩草草甸、金露梅灌丛 ULR、DLR 以及 ELR 均具有明显的日、月变化。其中矮嵩草草甸、金露梅灌丛的 ULR 月平均日变化在北京时间 14:00 最高, 凌晨最低; DLR 在 16:00-18:00 最高, 凌晨最低; ELR 在 8:00 最低, 14:00 最高。月变化中, 两种植被类型区 ULR、DLR 的最低值出现在 1-2 月, 较高值出现在 7-9 月, 而 ELR 变化趋势比较复杂。总体而言, 金露梅灌丛的 DLR、ULR 变化值明显比矮嵩草草甸的高。

关键词: 植被类型; 地面长波辐射; 大气逆辐射; 气候学特征; 比较

Climatology Characteristics and Comparisons of Long-wave Radiation on Two Alpine Vegetation Types

SONG Cheng-gang^{1,2}, ZHANG Fa-wei¹, WANG Qin-xue³, DUMing-yuan⁴, ZHAO Liang¹, LI Ying-nian¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, Qinghai, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Institute for Environmental Studies

Tsukuba 3058506, Japan; 4. National Institute for Agro-environmental Science, Tsukuba 3058604, Japan)

Abstract The earth's boundary layer heat source is the result of downward shortwave solar radiation and upward long-wave surface radiation, which are closely correlated with the organism's activities in the boundary. Therefore it is important to study the long-wave radiation variations for understanding ecosystem matter and energy fluxes. By analyzing the observation data measured by flux covariance system of alpine *Kobresia humilis* meadow and *Potentilla fruticosa* shrubland on the northeast of Qinghai Tibetan Plateau in 2003, the variations and comparisons of upward long-wave radiation (ULR), downward long-wave radiation (DLR) and surface effective long-wave radiation (ELR) on the two vegetation types were discussed. The results showed that there were obvious diurnal and monthly variations of ULR, DLR and ELR on the two vegetation types. The peak value of monthly mean diurnal variations of ULR and DLR on the alpine meadow and shrubland appeared at 14:00 and 16:00-18:00 (Beijing time) and the lowest both appeared in the morning, respectively. Moreover, the maximum of ELR occurred at 14:00 and the minimum happened at 8:00. The highest value of monthly DLR and ULR occurred from July to September and the lowest in January and February, while ELR showed a complex change tendency. Overall, ULR and DLR of *Potentilla fruticosa* shrubland was much higher than that of *Kobresia humilis* meadow.

Key words Vegetation types; Upward long-wave surface radiation; Downward long-wave radiation; Climatological characteristics; Comparison analysis

* 收稿日期: 2010-07-23 ** 通讯作者。E-mail: ynl@nwipb.ac.cn

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-06-01); 中日合作项目“温暖化影响早期监测与评价”

作者简介: 宋成刚 (1986-), 内蒙临河人, 硕士研究生, 主要从事植物生态学研究。E-mail: scg8088@163.com

青藏高原的加热作用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^[1-2]。但青藏高原地形结构复杂,各地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。不同类型生态系统中,地面长波辐射(ULR)、大气逆辐射(DLR)、地面有效长波辐射(ELR)等不仅反映了地表对太阳辐射能吸收的多少,而且因受长波辐射影响地气温度差异明显,进而导致水汽、CO₂等物质交换及能量流动的不同。对于DLR、ULR及ELR的研究,在西北干旱地区的绿洲、沙漠、戈壁已开展了较多的工作^[3-7],季国良等^[8]曾报道过青藏高原的长波辐射特征,李英年等^[9]曾对祁连山海北高寒湿地的DLR、ULR进行过日和季节变化分析。然而,在青藏高原丰富多样的生态系统中,过去的研究大多集中在DLR、ULR等方面^[10-16],较少涉及DLR、ULR及ELR的研究^[1-2],特别是对距离相近的不同植被类型区DLR、ULR的对比分析更少。由于大气温度很大程度上是太阳辐射照射到云层及地表后再以长波辐射形式加热的结果,导致因地域或下垫面类型不同,加热大气的程度不同。受温度差异影响,不同地区的物质交换和能量流动因温度梯度作用所表现的范围及强度不同,也直接或间接地影响到地表能量平衡和包括水平衡在内的物质平衡过程。为此,讨论不同植被类型区DLR、ULR的变化特征,了解辐射能量收支和差异,可以为全面和详细地了解不同植被类型区的长波辐射和气象特征,特别是大气运动、物质与能量交换过程的作用提供科学依据。

2002年9月开始,中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)在高寒矮嵩草草甸(*Kobresia humilis* meadow)、金露梅灌丛(*Potentilla fruticosa* shrubland)两种植被类型区分别架设涡度相关观测技术系统一套,在进行CO₂/H₂O通量等观测的同时,亦进行常规气象要素的观测,从而对不同植被类型的辐射能量收支状况进行连续观测和分析。本文拟利用2003年观测资料,对比分析观测距离较近的高寒矮嵩草、金露梅灌丛两种植被类型的DLR、ULR及ELR的变化特征。

1 材料和方法

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,平均海拔约3240m。据海北站气象观测资料,该区域近20a来多年平均气温为-1.6℃,降水量约560.0mm,年日照时间可达2467.7h,反映出该地区气

温较低、年内无霜期极短、降水量相对丰富、日照充足的特点。暖季湿润、短暂、凉爽,而冷季干燥、漫长、寒冷^[17]。

金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛常分布在地阴坡、半阴坡、平缓滩地等。实验地在海北站东北方7km处夏秋放牧草场与冬春草场交错区域的“干柴滩”,地势平缓,地理位置为37°36'N,101°19'E,海拔3352m。金露梅灌丛是典型的高寒落叶灌丛,其群落外貌高低不等,一般由两层群落层组成,除上层金露梅灌丛组成木本植物群落外,下部生长有多种优良的牧草。金露梅灌丛株高在30~40cm,最高可达60cm,其盖度为60%~70%,下部草本群落的总盖度为80%,草本层平均高为8~16cm,有47种植物种类,约属15科37属^[18]。矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸常分布在土壤湿度适中的平缓滩地和山地阳坡。调查地点在海北站东南1km的北滩冬春放牧草场,地势平缓,37°36.4'N,101°18'E,海拔高度为3218m。以矮嵩草为建群种的矮嵩草草甸群落,外貌整齐、均匀,植被的总盖度为93%,草层高度为10~20cm,约有54种植物种类,约属19科40属。

1.2 研究方法

辐射及各分光辐射观测由微气象-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观测,其辐射表有太阳短波总辐射表(CM11, Kipp&Zonen USA),地面和大气长波辐射表(CNR-1, Kipp&Zonen USA, 2002年生产并在当年架设安装),安装高度在植被冠面上方1.5m处。除DLR、ULR直接测定外,ELR是由地面长波辐射与大气逆辐射之差计算得到。由于数据受供电、仪器性能等影响缺测较多,普查发现2003年数据较为完整,故本文所采用的研究资料为2003年1月1日-12月31日的一个完整年份。观测采用北京时间,以0:00划分日界。数据系自动采集和存储经系统处理后输出30min平均值。

2 结果与分析

2.1 两种植被类型区DLR、ULR及ELR的日变化特征及比较

2.1.1 DLR、ULR的日变化特征及比较

大气对辐射的吸收和放射随水汽、CO₂、O₃等含量的不同具有不同的选择性,正是这些性质造成不同地区DLR、ULR有着相异的变化特征。图1给出了海北高寒金露梅灌丛和高寒矮嵩草草甸两种植被类型1月、4月、7月、10月DLR、ULR的月平均日变化。采用该4个月的数据主要是因为,1月为寒冷、干燥的冬季,月平均气温年内最低;4月是冬季向夏季季节

转换的春季,土壤解冻,深层 20m 以下季节冻土仍然维持,植物开始萌动发芽;7月是温度高、降雨集中,季节冻土完全融化,水热同期下植物生长最为旺盛的夏季;10月是温度降低、季节冻土开始、植物进入枯黄初期的秋季。由图 1 可见,不同季节金露梅灌丛和矮嵩草草甸两种植被区 DLR、ULR 日变化分布差异较大,但变化趋势基本相同,所给出的两种植被区 1月、4月、7月、10月 DLR 月平均日变化较 ULR 平稳,特别是季节转换期的 4月和 10月比寒冷的 1月和湿热的 7月平稳性尤为明显,日间波动很小。相同植被类型区 1月和 7月日变化相对 4月和 10月明显,表现出该地区寒冷的 1月和湿热的 7月大气温度变化剧烈。同时看到,年内任何时期金露梅灌丛的 DLR 值

高于矮嵩草草甸。日最低值常出现在日出前后,且随季节不同略有一定的差异,两植被区 DLR 在 1月日最低可降到 $150 \sim 195 W \cdot m^{-2}$ (矮嵩草草甸区日最低可降到 $150 W \cdot m^{-2}$)。4月、7月、10月日瞬时最低很少降低到 $250 W \cdot m^{-2}$ 以下。日间随温度增高,DLR 逐渐增加,日瞬时最高值出现在午后,在 4月和 7月出现时间可推迟到 17:00-19:00 且日最高值随季节不同而不同。矮嵩草草甸 1月、4月、7月、10月的 DLR 的日瞬时月平均最高分别为 194.4、275.5、347.2、268.5 $W \cdot m^{-2}$,平均最低分别为 153.9、243.1、314.8、247.7 $W \cdot m^{-2}$,而金露梅灌丛 DLR 日瞬时月平均最高分别为 228.7、346.7、385.4、348.4 $W \cdot m^{-2}$,平均最低分别为 180.6、314.8、338.0、327.2 $W \cdot m^{-2}$ 。

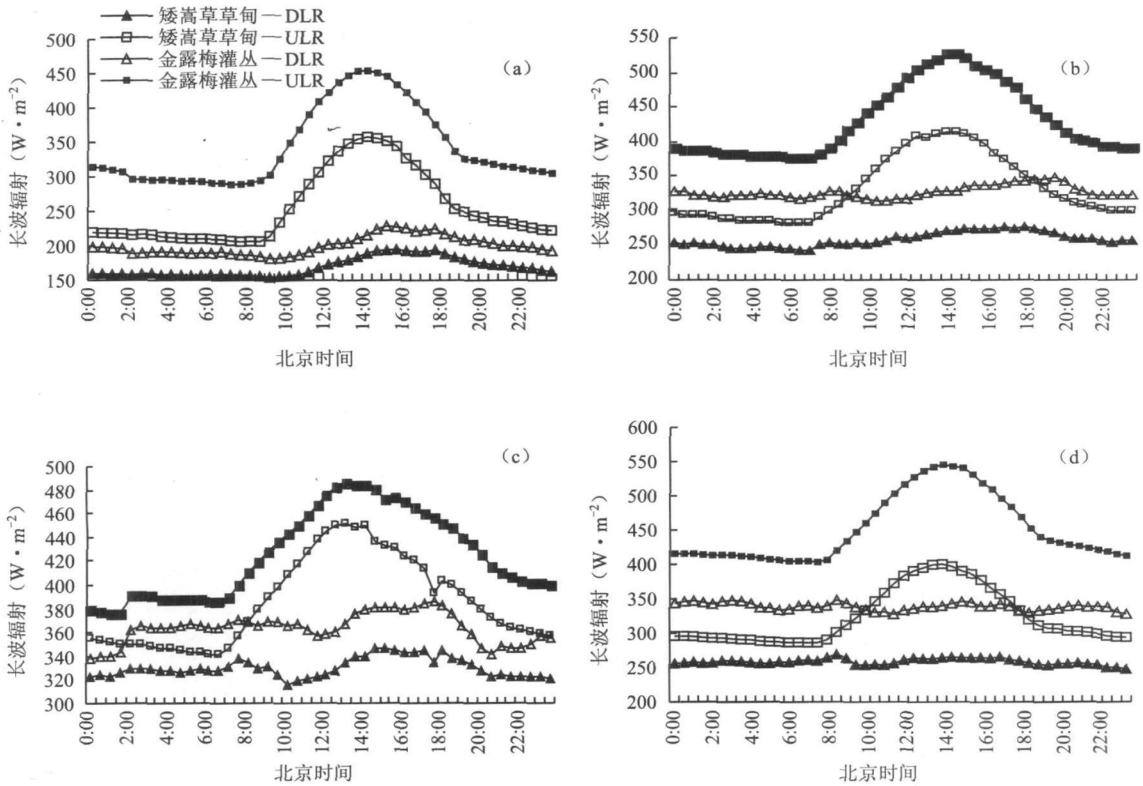


图 1 两种植被类型 1月 (a)、4月 (b)、7月 (c)、10月 (d)地面长波辐射 (ULR)、大气逆辐射 (DLR)月平均日变化

两种植被日间由于受地表加热影响,长波辐射随温度升高增大明显,导致 ULR 月平均日变化与地表温度变化趋势一致,日最低值常出现在日出前后地面温度最低时期,而最高则出现在温度最高的中午,夜间变化平稳,其日较差明显大于 DLR。同样不论何季节金露梅灌丛的 ULR 值大于矮嵩草草甸。季节不同日最高、最低分布也有所不同,矮嵩草草甸 1月、4月、7月、10月的 ULR 日瞬时月平均最高分别为 357.6、414.3、451.4、400.5 $W \cdot m^{-2}$,月平均最低分别为 206.0

282.4、341.4、285.9 $W \cdot m^{-2}$,金露梅灌丛日瞬时月平均最高分别为 454.1、527.8、487.3、545.1 $W \cdot m^{-2}$,月平均最低分别为 289.4、376.1、376.4、403.3 $W \cdot m^{-2}$ 。

图 2 给出了金露梅灌丛与矮嵩草草甸区 DLR、ULR 差值的月平均日变化。由图 2 可见,在两种植被类型区,无论是 DLR 还是 ULR 其差值的日变化都比较平缓,比较而言,1月、4月、10月波动较小,而 7月波动明显。在冬季 (1月,图 2a)两条差值线间的差距较大,大约相差 $60 W \cdot m^{-2}$ 。随季节的推移和温度的

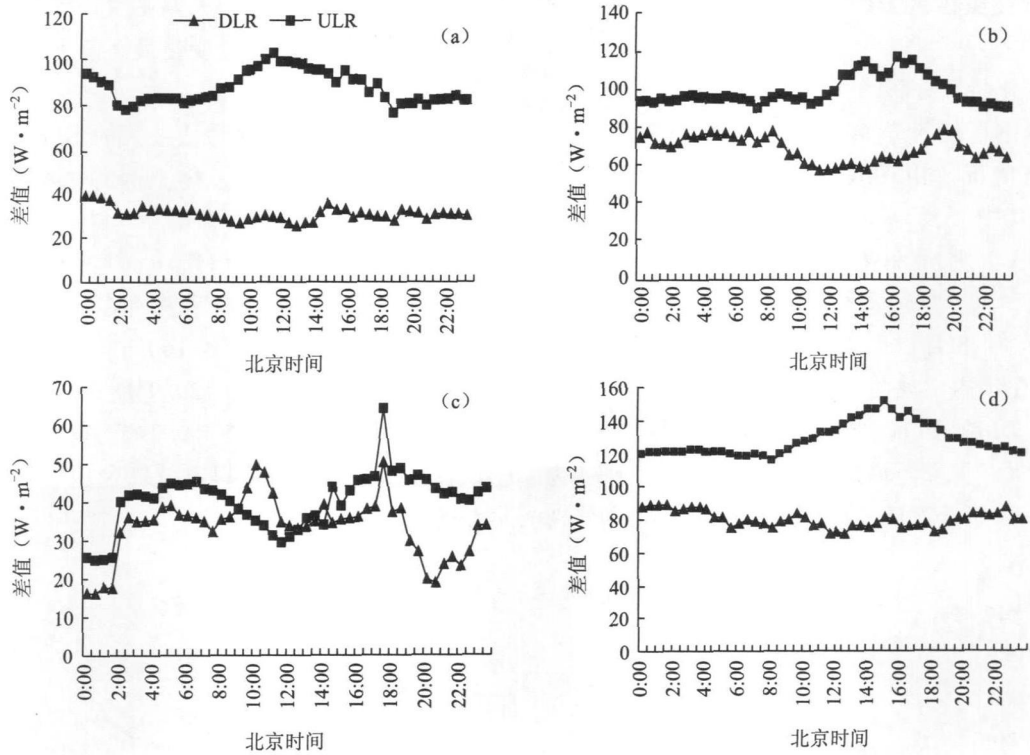


图 2 金露梅灌丛与矮嵩草草甸 1 月 (a)、4 月 (b)、7 月 (c)、10 月 (d) DLR ULR 差值的月平均日变化

增高差距逐渐缩小,到 7 月最小,也最为复杂,两线交互重叠(图 2c)。总体上,两种植被类型区 ULR 的差值表现为,夜间小、日间大。主要原因是,金露梅灌丛区处在海拔相对较高的地区,日间温度变化比较剧烈,而矮嵩草草甸的地表温度日间变化则较平缓。

2. 1. 2 ELR 的日变化特征及比较

地面有效辐射为地面长波辐射与大气逆辐射之差,与下垫面的性质和大气状况密切相关。图 3 分别给出了海北高寒矮嵩草草甸 (a) 和高寒金露梅灌丛 (b) 两种植被类型 1 月、4 月、7 月、10 月 ELR 的月平均日变化。图 3 可以看到,不同季节两种植被类型的 ELR 日变化趋势几乎一致,日出前后最低,中午最高。

其中矮嵩草草甸 1 月、4 月、7 月、10 月的 ELR 日瞬时月平均最高分别为 170.6、143.2、121.7、137.1 $W \cdot m^{-2}$,月平均最低分别为 48.8、36.9、13.9、24.9 $W \cdot m^{-2}$;而金露梅灌丛日瞬时月平均最高分别为 243.7、200.3、121.4、206.6 $W \cdot m^{-2}$,最低分别为 99.9、57.0、21.9、64.5 $W \cdot m^{-2}$ 。总体看,金露梅灌丛 ELR 值高于矮嵩草草甸,特别是在植物生长旺盛的 7 月差异更明显,日最高出现在 12:00 较 1、4、10 月出现时间提前,约在 14:00 且值最低,这显然是在 12:00 温度高,地面加热速度快,使 ULR 迅速增大大幅度远大于 DLR 所致,而 7 月 ELR 值最低主要是与雨季天空总云量增多造成大气逆辐射迅速增大等因素密切相关^[3]。

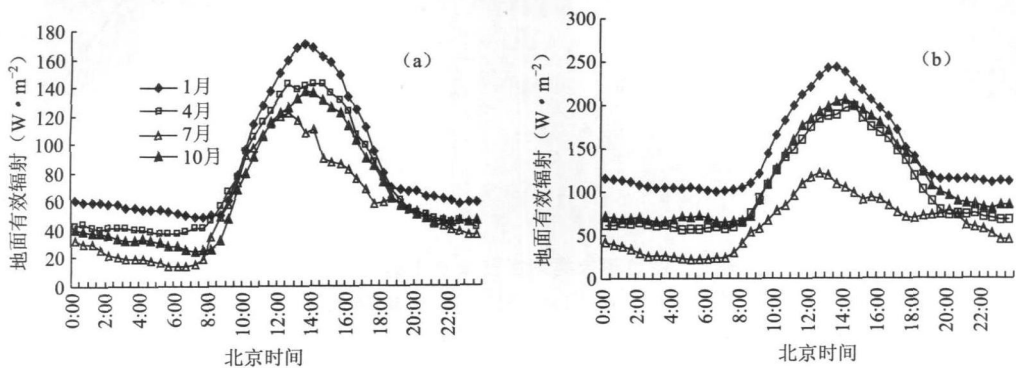


图 3 矮嵩草草甸 (a) 和金露梅灌丛 (b) 四季典型月地面有效长波辐射 (ELR) 的平均日变化过程

2.2 两种植被类型区 DLR, ULR 及 ELR 的月变化特征及比较

2.2.1 月变化特征分析

图 4a 给出了矮蒿草草甸和金露梅灌丛 DLR 和 ULR 月变化情况。由图可见, DLR 的变化基本与 ULR 一致。其中矮蒿草草甸 DLR、ULR 的季节变化呈单峰曲线, 1 月最低 (分别为 $439.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $661.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 7 月最高 (分别为 $855.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $998.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 8 月以后下降; 而金露梅灌丛 DLR、ULR 月变化在年内出现两个高值和两个低值, 8 月份达到最高 (DLR、ULR 分别为 $1158.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1332.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 2 月最低 (DLR、ULR 分别为 $490.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $752.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 次高和次低值分别

出现在 5 月和 6-7 月。从图 4a 中还可以看出金露梅灌丛 DLR 和 ULR 月变化最高值出现比矮蒿草草甸的约晚 1 个月。

由图 4b 看到, 两种植被区的 ELR 在年内也有一定的季节变化特点。总体上两种植被类型长波有效辐射在 1 月和 12 月较高, 其中 1 月最高分别为 $371.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $222.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 与季国良等^[13]的研究结果相同; 而 7 月、8 月、9 月在年内较低, 金露梅灌丛最低值出现在 7 月, 为 $160.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 矮蒿草草甸最低值出现在 8 月, 为 $120.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。总之, 在高原季风建立前, 由于地表相对干燥, 空气中水汽含量小, 以及云覆盖率低等使得有效辐射达到全年较大值, 而在雨季则明显降低^[13]。

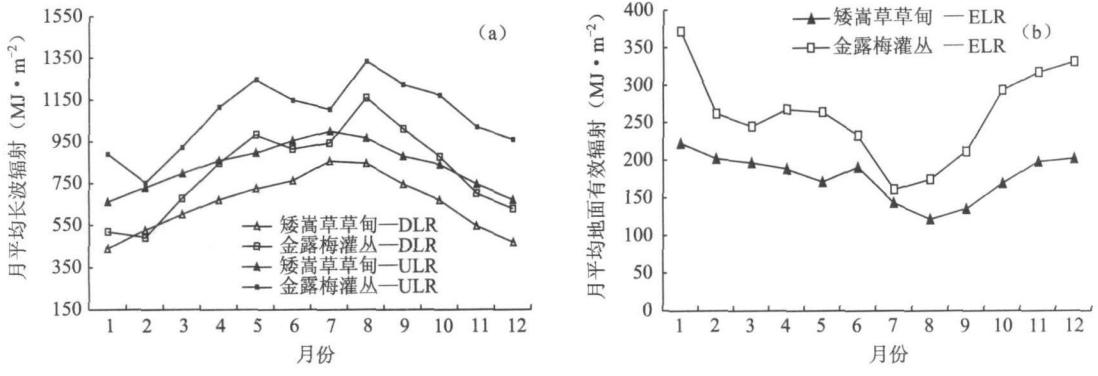


图 4 两种植被区地面长波辐射 (ULR) 和大气逆辐射 (DLR) (a)、地面有效长波辐射 (ELR) (b) 的月变化过程

2.2.2 两种植被类型区 ULR, DLR 和 ELR 的差异及可能原因分析

金露梅灌丛 ULR、DLR 值高于矮蒿草草甸的原因主要表现在: 冬季, 由于区域逆温层强^[17], 金露梅灌丛处在相对较高的地区, 地表温度大于海拔较低的矮蒿草草甸地区, 如普查资料表明 (图 5a 图 5b), 1 月和 12 月金露梅灌丛地区地表温度和气温分别为

- 8.76°C、- 5.72°C 和 - 13.64°C、- 12.74°C, 而同期矮蒿草草甸地区的地表温度和气温分别为 - 11.18°C、- 7.16°C 和 - 15.00°C、- 13.53°C, 表现出金露梅灌丛地区的气温和地温均大于矮蒿草草甸地区。这意味着冬季金露梅灌丛草甸的 ULR、DLR 均较大, 而且 ULR 值明显大于 DLR 值。

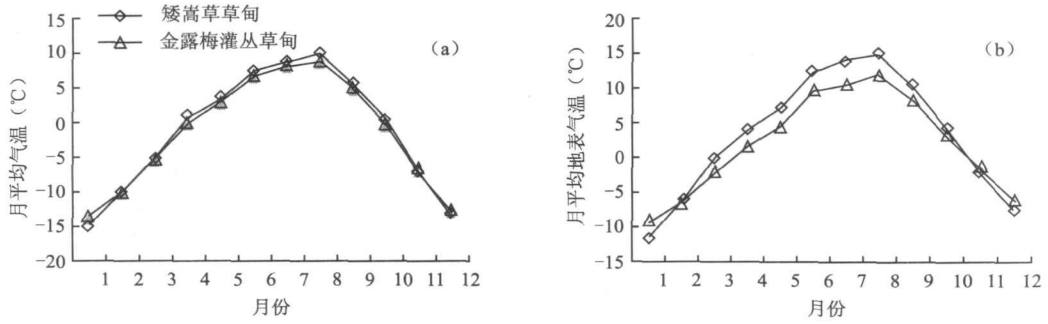


图 5 两种植被类型区气象要素的变化特征 (a) 月平均气温; (b) 月平均地表温度

而在夏季, 虽然矮蒿草草甸地表温度和气温均大于金露梅灌丛 (图 5a 图 5b), 如 7 月矮蒿草草甸月平均地表温度和气温分别为 14.60°C 、 9.06°C , 金露梅灌

丛地表温度和气温分别为 10.99°C 、 8.38°C 。但在日变化过程中, 金露梅灌丛因有较高的灌木层, 郁闭度高, 通风不良, 冠层内空气乱流交换减弱, 热量易储

存, 形成类似暖棚式的温室效应^[19]。矮嵩草草甸植被低矮, 仅在 30m 以内, 通风透气状况好, 乱流交换程度强, 易于散热, 这种条件下将导致金露梅灌丛地温日变化幅度较矮嵩草草甸低。同时, 金露梅灌丛地处海拔相对较高的地理位置, 日间空气流畅, 热量交换迅速, 气温下降幅度较矮嵩草草甸气温下降幅度明显。特别是在夜间, 太阳辐射增温停止, 金露梅灌丛因植株较大且密集, 放热面积大, 维持时间长, 也可使灌丛地表温度与气温之间差异加大, 终究导致金露梅灌丛区 ULR 与 DLR 差值明显大于矮嵩草草甸。

3 讨论与结论

对本研究所获得的辐射观测资料分析发现, 虽然年内大部分时间矮嵩草草甸月平均地表温度和气温均高于金露梅灌丛, 但却表现出金露梅灌丛的 ULR、DLR 高于矮嵩草草甸, 可能原因是由于两植被类型区水平距离较近 (直线距离约 8km), 处在同一天气系统控制下, 它们之间的差异只是由局地下垫面性质所决定。而地面有效长波辐射 (ELR) 也表现出金露梅灌丛高于矮嵩草草甸, 这种差异是由金露梅灌丛郁闭度高、通风不良, 空气乱流交换程度较弱, 在近地表形成类似暖棚式的温室效应, 以至于在金露梅灌丛区地气温差较大的原因所致。通过对实测资料进行对比分析, 得出以下初步结论:

(1) 海北站金露梅灌丛和矮嵩草草甸的 ULR、DLR、ELR 日变化最高值常出现在温度高的 14:00–16:00, 最低值在 6:00–10:00。两植被类型区的 DLR、ULR 的月变化, 在植物生长期 7–9 月较高, 1–2 月最低, 而 ELR 的月变化较低值出现在 7–9 月。

(2) 两种植被类型区的 ULR 日变化规律与 DLR 同步, 只是金露梅灌丛的 DLR、ULR、ELR 明显高于矮嵩草草甸, 且最高值出现时间有一定的滞后性。

(3) 两种植被类型区的 ELR 具有明显的月变化, 最高出现在 1 月, 金露梅灌丛和矮嵩草草甸分别为 $371.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $222.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$; 金露梅灌丛最低在 7 月 ($160.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 而矮嵩草草甸最低在 8 月 ($120.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 最低值出现相差一个月。

需要指出的是, 由于本研究所采用的仅为一年数据, 很难做出长期预测, 但仍能为两植被类型区长波辐射变化特征的进一步研究提供一定的参考。

参考文献:

- [1] Kou H L, Qian Y F. Influence of the Tibetan Plateau on cumulative and diurnal changes of weather and climate in summer Mon [J]. *Weather*, 1981, 109: 2337-2356
- [2] 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] 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.
- [4] 文军, 王介民. 绿洲边缘内外近地面辐射收支分析 [J]. *高原气象*, 1997, 16(4): 359-366.
- [5] 王胜, 张强, 卫国安. 敦煌绿洲—戈壁过渡带地表辐射与能量特征分析 [J]. *高原气象*, 1997, 24(4): 556-562.
- [6] 吴锦奎, 丁永建, 魏智, 等. 黑河中游间作农田的辐射收支特征分析 [J]. *高原气象*, 2007, 26(2): 286-292.
- [7] 沈志宝, 邹基玲. 黑河地区沙漠和绿洲的地面辐射能收支 [J]. *高原气象*, 1994, 13(3): 314-322.
- [8] 季国良, 江灏, 吕兰芝. 青藏高原的长波辐射特征 [J]. *高原气象*, 1995, 14(4): 451-458.
- [9] 李英年, 王勤学, 杜明远, 等. 祁连山南北高寒湿地微气象日变化特征 [J]. *高原气象*, 2008, 27(1): 193-201.
- [10] 季国良. 青藏高原能量收支观测实验的新进展 [J]. *高原气象*, 1999, 18(3): 333-340.
- [11] 马耀明, 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.
- [12] 张宪洲, 王辉民, 张谊光. 青藏高原冬小麦田辐射能量收支的初步研究 [J]. *应用气象学报*, 1997, 8(2): 236-241.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 马伟强, 马耀明, 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.
- [16] 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.
- [17] 李英年, 赵全新, 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.
- [18] 李英年, 赵亮, 王勤学, 等. 高寒金露梅灌丛生物量及年周转量 [J]. *草地学报*, 2006, 14(1): 72-76.
- [19] 兰云峰, 索亚林, 乌力吉纳森, 等. 人工灌丛草场小气候效应初探 [J]. *内蒙古草业*, 1999, (1): 20-26.