

# 黄河源区高寒湿地近地面辐射收支特征初步分析

谢 琰<sup>1,2</sup>, 文 军<sup>1</sup>, 刘 蓉<sup>1</sup>, 王 欣<sup>1</sup>, 贾东于<sup>1</sup>

(1. 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 利用2014年6月1日~2015年5月15日黄河源区麻多陆面过程观测试验近地面辐射收支观测资料, 分析高寒湿地下垫面辐射收支和反射率的时间变化特征。结果表明: 黄河源区高寒湿地向下太阳短波辐射、地面向上短波辐射和地面向上长波辐射有明显日变化特征, 大气向下长波辐射的日变化不明显。年平均日总量, 地面长波向上辐射( $26.784 \text{ MJ/m}^2$ )最大, 大气长波向下辐射次之( $20.390 \text{ MJ/m}^2$ ), 其次是向下太阳短波辐射( $17.539 \text{ MJ/m}^2$ ), 地面向上短波辐射( $3.888 \text{ MJ/m}^2$ )最小。以上各分量均为冬季最小, 前2个分量春季最大, 后2个分量夏季最大。典型晴天地表反射率日变化和季节变化特征均为“U”形, 全年平均地表反射率为0.18。地面长波有效辐射日变化趋势明显, 春季、秋季和冬季地面长波有效辐射日平均相差不大, 而夏季略小。不同季节日间地表吸热值较大, 数值差异也较大, 而夜间放热值小且数值差异小, 但维持时间较长(12~15 h), 总的来说该地区为一个强热源。

**关键词:** 太阳辐射; 大气辐射; 辐射通量密度; 黄河源区; 观测

**中图分类号:** P413

**文献标识码:** A

## 0 引 言

湿地是水体、土壤和植被的混合体, 能调节当地气候、净化当地空气, 被誉为“地球之肾”<sup>[1,2]</sup>。青藏高原由于高海拔和冰川冻土地貌, 其陆面过程对全球, 尤其我国气候有重要影响<sup>[3,4]</sup>。地表辐射收支与地表增温或冷却、蒸发、能量及地-气间的相互作用有直接关系<sup>[5]</sup>。以地表热量平衡和辐射平衡为主的地表能量交换过程是地-气耦合过程的能量纽带<sup>[6]</sup>。而地表能量交换过程不仅在全球气候变化和异常中起到关键作用, 也影响着局地小气候效应<sup>[7]</sup>。并且近地面辐射四分量在生态系统能量流动及物质循环过程中具有极其重要的作用<sup>[8]</sup>。因此, 研究黄河源区湿地地表辐射收支及能量平衡对黄河源区气候的变化及对中下游生态环境具有重要影响。目前对青藏高原下垫面的研究主要是在高寒草原、高寒草甸和高寒荒漠: 高原冬季小麦田反射率和净辐射日变化特征明显, 并且净辐射和总辐射之间存在良好的线性关系<sup>[9]</sup>; 晴天海北高寒草甸植被辐射的各项收支均有明显的日变化规律, 净辐射日间为正夜间为负, 反射率

早晚高, 中午较低<sup>[10]</sup>; 藏北高原草甸地面对大气而言日平均为强热源, 季风前后太阳短波辐射变化曲线较一致, 且净辐射、感热、潜热及土壤热通量日变化明显, 地表反射率为0.187, 介于沙漠和农田之间<sup>[11,12]</sup>。但对高寒湿地下垫面近地面辐射收支的研究较少。

黄河源区是生态环境最脆弱的地区之一, 对气候变化响应极敏感<sup>[13]</sup>。本文利用黄河源区麻多乡陆面过程观测试验辐射收支观测资料, 综合分析高寒湿地下垫面辐射收支各分量的日变化和季节变化特征, 并将高寒湿地地表反射率与其他不同下垫面进行比较。通过分析, 发现高寒湿地下垫面辐射收支的时间变化特征, 有助于认识高原辐射收支对高原气候变化的影响。

## 1 研究区域及资料介绍

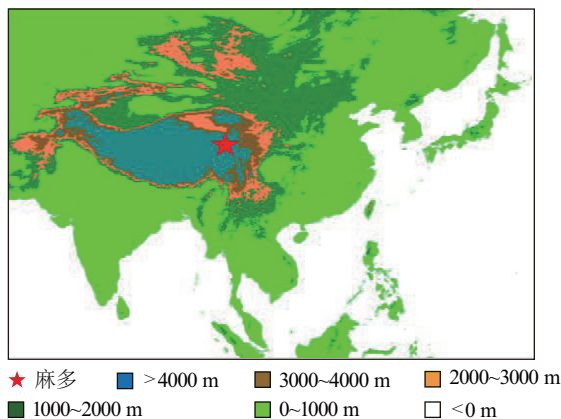
黄河源位于青藏高原东北部, 区域内分布有盆地、草甸、高山、峡谷、冰川、湖泊和冻土等众多地貌。青海省玉树藏族自治州曲麻莱县位于黄河源西南部, 玉树州境内北部, 地处青藏高原黄河源, 县域内平均海拔在4500.0 m以上。麻多乡位于曲麻

收稿日期: 2016-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(41530529; 41375022); 国家自然科学基金重大研究培育计划培育项目(91737103)

通信作者: 文 军(1964—), 男, 博士、研究员, 主要从事陆面过程与气候变化方面的研究。jwen@lzb.ac.cn

莱县辖乡,在县境东北部,距县府驻地 220.0 km,面积 1300 km<sup>2</sup>。本文所用资料取自中国科学院麻多黄河源气候与环境变化观测站(经度 96°23',纬度 35°02',海拔 4313.0 m,见图 1)位于麻多乡西南,高寒缺氧、日照时间长、紫外线强。冷暖两季,冷季长达七八个月,暖季只有四五个月,气候比较干燥。年温差不大,日温差较大。年均气温-3.3℃,年均降水量 380~470 mm,属典型的高原高寒气候。下垫面植被类型为均匀的高寒草甸或季节性湿地,地势比较平坦开阔。观测站常年有人看守,专业技术人员每年分别于 5 月下旬和 9 月下旬维护 2 次。



a. 环境观测站地理位置



b. 观测场(冬季)

图1 中国科学院西北生态环境与资源研究院麻多黄河源气候与环境观测站地理位置和观测场(冬季)

Fig. 1 Geographic location and the Maduo observatory of climate and environment of the Northwest Institute of Eco-Environment and Resource, CAS (winter)

本文选取 2014 年 6 月 1 日~2015 年 5 月 15 日向下太阳短波辐射、地面向上短波辐射、地面长波向上辐射、大气长波向下辐射、地表反射率和地面净辐射的辐射观测资料,观测仪器为荷兰 Hukseflux

公司生产的 NR01 四分量/净辐传感器。该仪器有独立的日光(短波波长范围 305~2800 nm)及远红外(长波波长范围 4500~50000 nm)的辐射测量,可测近地面辐射平衡的 4 个独立的成分。输出的 4 个小电压对应于长波、短波的入射量和反射量。为测量空中和表面温度,在地面辐射强度计中安装一个 Pt100 温度传感器。NR01 整体性能指标:温度范围-40~+80℃,量程范围 0~2000 W/m<sup>2</sup>。该仪器每日观测时间范围为北京时间 00:00~23:30,每 30 分钟记录一次数据,此数值为数据记录时刻前后 10 min 的平均值。通过观测数据计算得到地面长波有效辐射,再分别对以上数据进行全年平均和季节平均的日变化以及季节变化的统计分析。在此期间内,筛选各月的典型晴天地表反射率进行月平均的日变化分析,并且筛选出典型晴天太阳高度角最大时段的地表反射率进行月平均的季节变化分析,除 3 月份和 8 月份无典型晴天,用晴天资料代替。

## 2 结果分析

利用黄河源区麻多乡 2014 年 6 月 1 日~2015 年 5 月 15 日的站点资料,分析得到高寒湿地下垫面太阳短波向下辐射、地面短波向上辐射、地面长波向上辐射、大气长波向下辐射、近地面净辐射以及地面反射率的变化特征。

### 2.1 近地面向下太阳短波辐射

太阳辐射经过大气层时会受到吸收和散射作用,最后到达地表的太阳总辐射由直接辐射和散射辐射两部分组成,两者之和为向下太阳短波辐射。因此,向下太阳短波辐射是由太阳高度角和大气透明度共同决定的,而太阳高度角的变化是影响太阳短波向下辐射的最主要原因。由图 2 可看出,高寒湿地向下太阳短波辐射有明显的日变化特征。从日出开始,太阳短波向下辐射逐渐增大,到 13:00 (北京时,下同)最大,然后又逐渐减小,直至日落达到最小。全年平均和季节平均的向下太阳短波辐射日变化规律和太阳高度角的日变化规律基本一致,中午时达到最大,早晚最小;不同季节平均向下太阳短波辐射最大值为春季最大,夏季次之,冬季最小。夏季高寒湿地太阳短波向下辐射在午后有明显波动,呈“双峰”形式,这是由于高寒湿地夏季近地层水汽含量较大,且经过长时间太阳辐射加

热,使位势不稳定能量累积,午后在湿地上空容易形成对流云。说明该地区夏季向下太阳短波辐射受云雨天气影响较大,使夏季向下太阳短波辐射日变化峰值减小,而春秋冬三季向下太阳短波辐射日变化较平滑,说明这三季受云雨天气影响较少。各季节向下太阳短波辐射日总量变化与其最大值有类似规律(如表 1),春季最大,为 23.390 MJ/m<sup>2</sup>,

夏季次之,为 21.254 MJ/m<sup>2</sup>,秋季为 15.811 MJ/m<sup>2</sup>,冬季最小,为 12.700 MJ/m<sup>2</sup>,说明高寒湿地向下太阳短波辐射日总量主要是由太阳高度角的季节性变化决定的,而夏季小于春季则是由于夏季多云雨天气影响。年平均而言,不同时刻向下太阳短波辐射的年平均变化范围在 0.0~688.1 W/m<sup>2</sup> 之间,日总量为 17.539 MJ/m<sup>2</sup>。

表1 黄河源区高寒湿地辐射收支各分量日总量的年平均和季平均变化(MJ/m<sup>2</sup>)

Table 1 Annual and seasonal average variation of daily amount of each radiation component in alpine wetland in source area of the Yellow River(MJ/m <sup>2</sup> )					
分量季节	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
向下太阳短波辐射	23.390	21.254	15.811	12.700	17.539
地面向上短波辐射	5.098	3.456	3.370	2.851	3.888
地面长波向上辐射	26.784	30.586	26.438	23.155	26.784
大气长波向下辐射	20.131	24.710	19.786	16.502	20.390

2.2 近地面向上短波辐射

地面接收到的向下太阳短波辐射一部分被地面吸收,另一部分被地面反射回大气。被地面反射回大气的向下太阳短波辐射为地面向上短波辐射。从图 2 可知,对全年平均而言,日出后地面向上短波辐射逐渐增大,13:00 到达最大值 141.3 W/m<sup>2</sup>,然后又逐渐减小,日落后至第 2 天日出前,由于无向下太阳短波辐射,地面向上短波辐射自然趋于零。日出后地面短波向上辐射远小于向下太阳短波辐射,仅占向下太阳短波辐射的 22.2%。因此向下太阳短波辐射能量约有 3/4 被高寒湿地地表吸收,储存于地表使地表温度升高,或通过长波辐射的形式返射回大气,只有小部分向下太阳短波辐射能量直接被反射回大气。地面向上短波辐射日总量在不同季节有明显差异(如表 1),和向下太阳短波辐射相同,其量值随春夏秋冬依次减小,年平均日总量为 3.888 MJ/m<sup>2</sup>。说明高寒湿地近地面向上短波辐射主要受向下太阳短波辐射的影响,地表特性对其的影响次之。

2.3 近地面长波向上辐射

如果将地表视为黑体,根据斯蒂芬-波耳兹曼定律,地面长波向上辐射和地表温度的四次方成正比。因此当地表性质相同时,地面长波向上辐射由地表温度决定,地表温度越高,地面长波向上辐射

就越大。在高原上,对地表温度影响最大的是向下太阳短波辐射,因此地面长波向上辐射有和向下太阳短波辐射类似的日变化特征。如图 2a 所示,中午地表温度最高,地面长波向上辐射在 14:00 达到最大值(370.1 W/m<sup>2</sup>)。和向下太阳短波辐射不同,虽然地面长波向上辐射在日落后至日出前较小,但并不为零。因为在高原地表温度的日较差较大,夜间地表温度较低,所以夜间的地面长波向上辐射明显小于日间。由于地表一直在放热,并且夜间无向下太阳短波辐射,即使有大气长波向下辐射的加热,地表也处于失热状态,因此在日出前地面温度达到最低,地面长波向上辐射也出现最小值(在各季节平均和年平均图上均能看到),说明对不同季节和全年平均而言,在高寒湿地向下太阳短波辐射对地表的加热比大气长波向下辐射对地表的加热更为重要。

从图 2b~图 2e 可知,四季的地面长波向上辐射均具有相同的日变化规律,在 14:00 达到最大值,春夏秋冬四季分别为 381.8、411.0、356.1 和 330.5 W/m<sup>2</sup>,其中夏季最大,冬季最小。日出前达到最小值,分别为 270.1 (7.5 h)、316.9 (7.0 h)、278.6 (7.5 h) 和 237.1 W/m<sup>2</sup>(8.5 h)。从表 1 可知,年平均地面长波向上辐射日总量为 26.784 MJ/m<sup>2</sup>,夏季最大,为 30.586 MJ/m<sup>2</sup>,春季次之,为 26.784 MJ/m<sup>2</sup>,秋季为 26.438 MJ/m<sup>2</sup>,冬季最小,为 23.155 MJ/m<sup>2</sup>。说明高



寒湿地夏季地表平均温度最大,春秋季次之,且相差不大,冬季地表平均温度最小。

## 2.4 大气长波向下辐射

大气中的云、水汽、二氧化碳和气溶胶等对太阳短波辐射的吸收甚少,大气温度升高主要是吸收了地面长波向上辐射。已有研究表明,大气对地面长波辐射的吸收可到达 75%~95%<sup>[14]</sup>。因此,大气长波向下辐射的大小主要由地面长波向上辐射的大小决定,并且受大气状况(温度层结、大气密度和水汽含量等)、大气气溶胶浓度以及云况(云状、云量和云底温度等)等因素的影响。由图 2 可看出,大气长波向下辐射的日较差较小,全年平均大气长波向下辐射日变化范围为介于 223.3~254.4 W/m<sup>2</sup>之间,几乎无极大值,亦无地面长波向上辐射明显的日变化特征。大气长波向下辐射的较大值出现在 14:00 之后,比地面长波向上辐射最大值出现晚了约 2 h,说明在高寒湿地地面向上长波辐射加热大气具有一定的滞后性。日出后,向下太阳短波辐射开始增加,由于吸收了太阳辐射,地面开始增温,地面长波向上辐射增加。到 14:00,地面长波

向上辐射达到最大,由于地面长波向上辐射加热大气的滞后性,这时大气才开始增温明显,向下长波辐射才开始明显增加。在这之后,太阳短波向下辐射开始减小,地面向上长波辐射也开始减小,抑制了大气长波向下辐射的进一步增加,因此大气长波向下辐射的日变化曲线相对平缓,日变化趋势不明显。

晴天和云雨天气时的大气长波向下辐射不同,随着云量和水汽的增加,向下短波辐射减小,向下长波辐射增大<sup>[15]</sup>。各季大气长波向下辐射日总量由大到小分别为夏季 24.710 MJ/m<sup>2</sup>、春季 20.131 MJ/m<sup>2</sup>、秋季 19.786 MJ/m<sup>2</sup> 和冬季 16.502 MJ/m<sup>2</sup>,这是由于夏季高寒湿地云多且厚,并且空气中水汽含量较大,所以在这期间大气长波向下辐射较大;而冬季为高原的干旱期,降水少,多晴好天气,大气透明度高,这时大气长波向下辐射亦较小。说明夏季高寒湿地上空大气保温作用最强,而冬季最弱。年平均大气长波向下辐射日总量为 20.390 MJ/m<sup>2</sup>,占地面向上长波辐射的 76.1%,说明约有 3/4 的地面向上长波辐射被大气“反射”回到湿地。

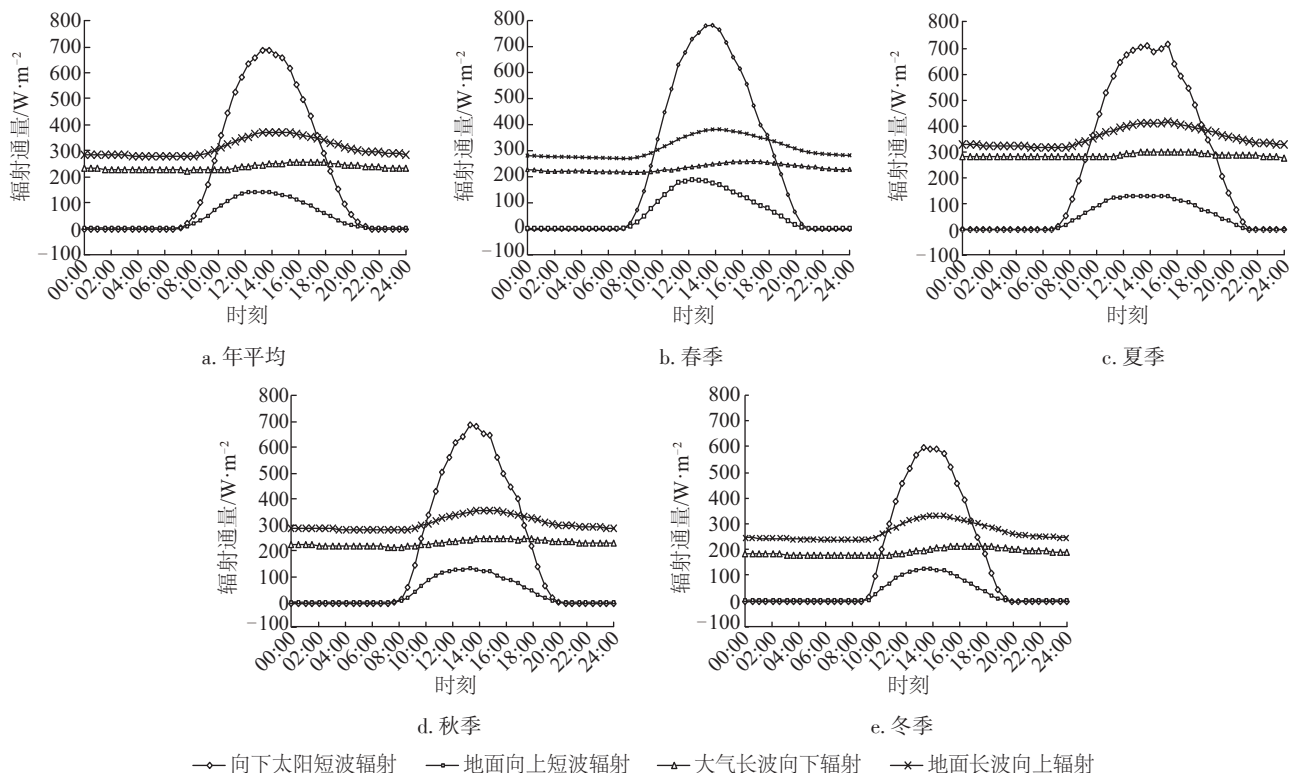


图 2 黄河源区高寒湿地不同季节的辐射收支

Fig. 2 Radiation budget of different seasons in alpine wetland in source area of the Yellow River

## 2.5 地表反射率

地表反射率是地表反射的向下太阳辐射与总辐射之比,表征地表对向下太阳辐射的反射能力。影响地表反射率的因素主要有下垫面本身的物理属性(湿度、颜色、粗糙度和植被覆盖等)、太阳高度角、光谱的分布等<sup>[16]</sup>。虽然反射率的量值较小,但它是影响地表能量收支和陆面过程的重要组成部分,是能量平衡中一个非常重要的因子。

若不考虑地表特性的影响,由于太阳高度角的变化导致入射角和到达地面的太阳光谱组成发生变化,典型的晴天地表反射率日变化是光滑的U型,并且U型分布状况在不同天气条件下略有差异。图3为各月典型晴天地表反射率日变化(除3月份和8月份无典型晴天,使用晴天资料代替),总体来说各月呈不太规则的U型特征。其中8月份的反射率明显偏高,这是由于云量、云状和云高等气

象因素造成的。5~10月份是高原植被的生长期—成熟—消亡期,在此期间内地表有不同数量和形态的植被覆盖,因此除8月份以外的各月反射率至中午可降至0.19~0.14。而在此期间早晚反射率较高,除太阳高度角的影响外,日出前后高寒湿地植被表面结露也对增大地表反射率有贡献。11月份至翌年4月份湿地表面多为冰雪覆盖,反射率普遍较大,中午可达约0.2。另外,该时期为高原的干旱期,降雨少且地面湿度低,使得地表反射率增大。

由于高原地区地表性质复杂多变,干湿季节分明,这使得地表反射率具有明显的季节特征。利用2014年6月~2015年5月连续一年的反射率时间序列,筛选出各月典型晴天且太阳高度角最大时段的地表反射率,结果如图4所示。总体来说,高寒湿地典型晴天地表反射率季节变化为V型分布。由于1月份和12月份湿地地表多被冰雪覆盖,且太阳高度角较低,因此此时地表反射率是一年当中最高的,为0.22。随着太阳高度角的增大,地表反射率明显减小。3月末~4月初,天气逐渐变暖,冰雪开始自上而下地融化,使冰面出现孔洞,枯黄的植被露出冰盖表面,两者的共同作用增大了地表粗糙度,地表反射率进一步减小。5月初高原牧草萌动返青,并且逐渐长高,使地表植被覆盖、地面粗糙度进一步增大,地表反射率亦进一步减小。7~9月份为高原夏季风期,是一年之中植被最茂盛且土壤湿度最大的时期,这时地表粗糙度最大,热容量最大,颜色最深,并且湿地地表多为积水,使地表反射率在这几个月中较小,其中9月份最小(为0.14)。8月份的反射率偏高是由于观测时段内没有典型晴天,使用晴天资料时天空总有云,由于云的存在增强了空气分子在云层和地面之间的瑞利散射,而散射辐射是来自各个方向的,导致地表反射率增大<sup>[17,18]</sup>。随着高原夏季风期结束,降雨减少,土壤湿度降低,植被枯黄,降雪和地表结冰逐渐将植被覆盖,因此10月份以后地表反射率逐渐增加。全年平均地表反射率为0.18,远小于敦煌沙漠下垫面的平均值(0.25)<sup>[19]</sup>,戈壁(化阴站)下垫面平均值(0.23)<sup>[20]</sup>,小于安多高原草甸(0.22)<sup>[4]</sup>、玛曲草原(0.22)<sup>[21]</sup>和藏北草地(0.22)<sup>[22]</sup>,略大于干旱区的绿洲地区(张掖)平均值(0.176)<sup>[23]</sup>,这个结果也较好地体现了高寒湿地下垫面的特性。

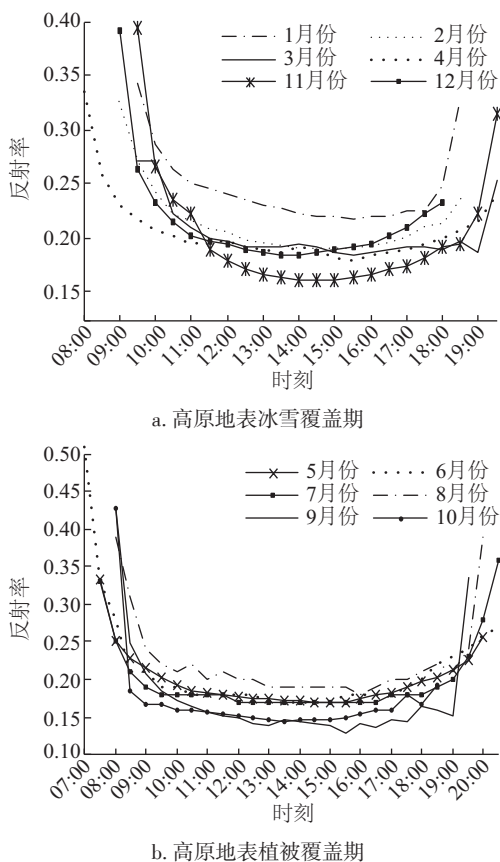


图3 不同季节黄河源区高寒湿地典型晴天地表反射率日变化

Fig. 3 Diurnal variation of the typical cloud-free surface albedo of different seasons in alpine wetland in source area of the Yellow River

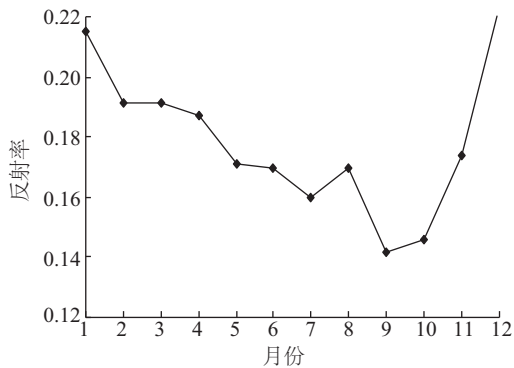


图4 2014年6月~2015年5月黄河源区高寒湿地典型晴天地表反射率的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of typical sunny surface albedo from June 2014 to May 2015 in alpine wetland in source area of the Yellow River

## 2.6 近地面长波有效辐射

近地面长波有效辐射是地面长波向上辐射和大气长波向下辐射的差值,表征地面净损失的长波辐射,主要受地表温度和大气状况(气温、水汽含量和云况等)等的影响。图5为各季节和全年平均地面长波有效辐射的日变化过程。由图5可见,高寒湿地地面长波有效辐射日变化趋势明显,并且在13:00达到最大值(与向下太阳短波辐射日变化趋势相似),无明显最小值。因此从日出至13:00,湿地地表增温相对快于大气;13:00至日落前,是大气增温相对快于湿地(或是大气降温相对慢于湿地)。全年平均黄河源区高寒湿地地面长波有效辐射日变化的最大值为  $122 \text{ W/m}^2$ ,且白天约为平均夜间的1.7倍。不同季节由于高寒湿地地表温度和大气状况的不同,地面长波有效辐射的日变化曲线也有所不同。春季、秋季和冬季地面长波有效辐射日变化趋势相似,但变化幅度不同,日间正午前后差异较明显,并且日间地面长波有效辐射越大,夜间地面长波有效辐射也越小,使得这三季的地面长波有效辐射日平均总体来说相差不大,分别为  $77.7$ 、 $76.4$ 、 $76.1 \text{ W/m}^2$ 。夏季夜间有效辐射较其他季节小得多,且日间有效辐射并不是很大,使夏季地面长波有效辐射日平均略小于其他三季,为  $68.5 \text{ W/m}^2$ 。在日出前夏季地面长波有效辐射明显减小,这是因为夏季高寒湿地近地面空气水汽含量较大,在日出前容易形成雾,使得大气长波向下辐射增大,从而有效辐射减小。而其余三季相

对于干燥,日出前没有雾的生成,则有效辐射在日出前相对稳定。

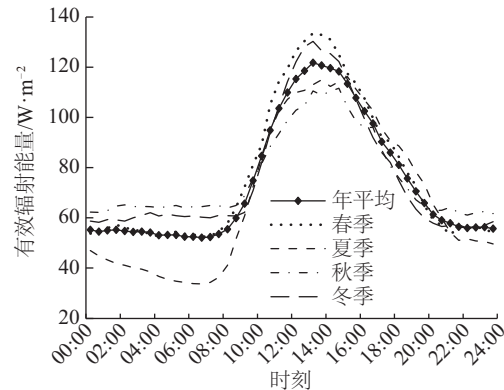


图5 2014年6月~2015年5月黄河源区高寒湿地近地面长波有效辐射的平均日变化

Fig. 5 Average diurnal variation of surface long-wave effective radiation from June 2014 to May 2015 in alpine wetland in source area of the Yellow River

## 2.7 近地面净辐射通量

近地面净辐射即地面收到的向下太阳短波辐射和大气长波向下辐射与地面发出的地面长波向上辐射和地面向上短波辐射的差额,表征地表收到的辐射盈余。选取2014年6月1日~2015年5月15日近一年的近地面净辐射通量观测资料进行分析,结果如图6所示。全年地表净辐射的变化范围在  $-61.7 \sim 429.2 \text{ W/m}^2$  之间。夜间地表净辐射为负值,说明不断有长波辐射能从湿地传递到近地层大气。由于地表净辐射的负值范围不是很大,地面损失的能量较少,则高寒湿地夜间为一个弱冷源。白天地表净辐射为正,且正值范围较大,说明湿地不断接收大量来自太阳和大气的能量,则高寒湿地白天为一个强热源。一日之内,地表净辐射分别在在09:00和19:00之后2次通过零点,即在日出后2h,高寒湿地地表从失去能量转变为得到能量,并且在日落之后,高寒湿地地表从获得能量转变为失去能量。净辐射通过零点的时间在近地层热量收支中是一个重要的物理量,它与湿地近地面出现霜冻等物理现象密切相关,在气候和农业气象等方面具有指示意义。湿地地表全年日平均得到能量为  $84.0 \text{ W/m}^2$ ,占太阳短波向下辐射的41.4%,由于地气系统最终的能量来源为太阳辐射,说明约有2/5的向下太阳短波辐射能量湿地表吸收并储存起来。



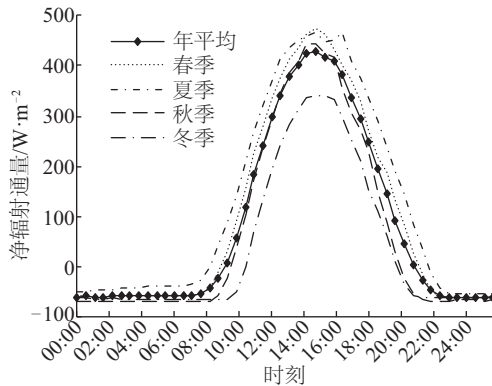


图6 2014年6月~2015年5月黄河源区高寒湿地近地面净辐射平均日变化

Fig. 6 Average diurnal variation of net radiation from June 2014 to May 2015 in alpine wetland in source area of the Yellow River

季节不同地表吸热和放热有所不同,如图6和表2所示。除夏季外,各季净辐射日变化均表现为“单峰”形式,春季白天获得的热量最多,最高可达

表2 黄河源区高寒湿地不同季节净盈或净亏能量表( $\text{W}/\text{m}^2$ )

Table 2 Table of net gaining or losing energy during different seasons in alpine wetland in source area of the Yellow River ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

分量季节	春季	夏季	秋季	冬季	全年平均
日间净盈能量日平均	281	297	270	204	248
夜间净亏能量日平均	55	42	65	62	55
日平均净盈能量	99	128	68	38	84
日净盈能量最大值	473(13.0 h)	467(13.0 h)	443(13.0 h)	341(14.0 h)	429(13.5 h)
夜净亏能量最大值	62.0	56.0	71.0	67.0	62.0
吸收热时段	8~19 h	8~20 h	9~18 h	9~18 h	8~19 h

### 3 结 论

通过利用2014年6月1日~2015年5月15日黄河源区麻多乡陆面过程试验近地面辐射收支观测资料,分析了黄河源区高寒湿地下垫面辐射收支特征,得到以下主要结论:

1) 向下太阳短波辐射、地面向上短波辐射和地面长波向上辐射有明显的日变化特征。就全年平均而言,前两项均在13:00达到最大值,分别为 $688.1$ 和 $141.3 \text{ W}/\text{m}^2$ ,后一项在午后达到最大值 $370.1 \text{ W}/\text{m}^2$ 。由于地面向上长波辐射加热大气的滞后性,大气向下长波辐射日变化不明显,变化范围为 $223.3\sim 254.4 \text{ W}/\text{m}^2$ 。夏季高寒湿地向下太阳短波辐射受云雨天气影响较大,在午后呈“双峰”型,而

473.0  $\text{W}/\text{m}^2$  (13.0 h),秋季较春季略少,最高可达 $443.0 \text{ W}/\text{m}^2$  (13.0 h),而冬季最少,在14:00时仅为 $341.0 \text{ W}/\text{m}^2$ ,最大值出现的时间也比春秋晚1 h。夏季净辐射日变化和向下太阳短波辐射日变化相同,为“双峰”形式,峰值分别为 $467.1 \text{ W}/\text{m}^2$  (13.0 h)和 $468.8 \text{ W}/\text{m}^2$  (15.0 h),并且峰值出现时间和变化趋势也与其相同,说明夏季高寒湿地近地面净辐射日变化主要受向下太阳短波辐射日变化的影响。秋季和冬季研究区域净损失热量的时段在傍晚约18:00~翌日09:00,地表放热时长约为15 h,放热最大值分别为 $71.0 \text{ W}/\text{m}^2$ 和 $67.0 \text{ W}/\text{m}^2$ ,而春季在傍晚约19:00~翌日08:00,比秋冬季推迟1 h放热,提前1 h吸热,放热时间缩短为13 h,最大值为 $62.0 \text{ W}/\text{m}^2$ ,夏季在傍晚约20:00~翌日08:00,比春季推迟1 h放热,放热时长为12 h,最大值为 $56.0 \text{ W}/\text{m}^2$ 。综上所述,高寒湿地下垫面日间地表吸热值较大,不同季节数值差异也较大,而夜间地表放热值小,不同季节数值差异也较小,但维持时间长(12~15 h)。

其余三季所受影响较小,日变化曲线较为光滑。

2) 年平均日总量,地面长波向上辐射( $26.784 \text{ MJ}/\text{m}^2$ )最大,大气长波向下辐射次之( $20.390 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ),之后是向下太阳短波辐射( $17.539 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ),地面向上短波辐射( $3.888 \text{ MJ}/\text{m}^2$ )最小。以上辐射分量在不同季节的量值均为冬季最小。向下太阳短波辐射春季略大于夏季,而地面长波向上辐射和大气长波向下辐射则与之相反。并且大气长波向下辐射占地面长波向上辐射的76.1%,说明约有3/4的地面向上长波辐射被大气“反射”回到湿地。从各季平均日总量来看,近地面向上短波辐射主要是受到向下太阳短波辐射的影响,而湿地地表特性对其影响次之。并且高寒湿地夏季大气的保温作用最强,冬季最弱。

3) 黄河源区高寒湿地典型晴天地表反射率呈早晚高、正午低的明显的 U 型变化。但受到湿地下垫面性质和大气状况的影响, 各月的 U 型分布也有所不同。典型晴天地表反射率季节变化为 V 型, 植被生长季较小, 地表雪盖期较大, 即高原夏季风期较小, 夏季风结束后逐渐增大。全年平均典型晴天地表反射率为 0.18, 远小于沙漠和戈壁地区, 小于高寒草甸地区, 略大于干旱区的绿洲地区, 该结果能较好地体现高寒湿地下垫面的特性。

4) 黄河源高寒湿地地面长波有效辐射日变化趋势明显, 日间大、夜间小。从日出至 13:00, 湿地地面增温相对快于大气; 13:00 至日落前, 大气降温相对慢于湿地。全年平均而言, 日间平均是夜间的 1.7 倍。春季、秋季和冬季地面长波有效辐射正午前后差异较明显, 并且日间越大, 夜间越小, 三季日平均相差不大, 分别为 77.7、76.4、76.1 W/m<sup>2</sup>。由于黄河源区高寒湿地夏季近地面空气水汽含量较大, 日出前容易形成雾, 大气长波向下辐射增加, 使得有效辐射在日出前有明显减小, 其日平均为 68.5 W/m<sup>2</sup>, 略小于其余三季。而其余三季相对干燥, 日出前没有雾的生成, 则有效辐射在日出前相对稳定。

5) 地面净辐射全年平均变化范围为 -61.7~429.2 W/m<sup>2</sup>, 并且分别在 09:00 和 19:00 之后 2 次通过零点。高寒湿地下垫面对大气而言日间为强热源, 夜间为弱冷源, 总的来说为强热源。地表获得能量全年日平均为 84.0 W/m<sup>2</sup>, 说明约有 2/5 的向下太阳辐射能被湿地地表吸收并储存起来。该地区日间地表获得能量平均为 248.0 W/m<sup>2</sup>, 夜间地表损失能量平均为 55.0 W/m<sup>2</sup>。春季白天获得的热量最为强烈(峰值在 13.0 h 为 473.0 W/m<sup>2</sup>), 秋季较春季略少(峰值在 13.0 h 为 443.0 W/m<sup>2</sup>), 冬季最低(峰值在 14.0 h 为 341.0 W/m<sup>2</sup>)。而夏季净辐射日变化主要受到向下太阳短波辐射的影响, 为“双峰”型, 峰值分别为 467.1 W/m<sup>2</sup>(13.0 h) 和 468.8 W/m<sup>2</sup>(15.0 h)。总的来说, 高寒湿地下垫面日间吸热值较大, 不同季节数值差异也较大, 而夜间放热值小, 不同季节数值差异也较小, 但维持时间长(12~15 h)。

#### 【参考文献】

- [1] 李凤霞, 常国刚, 肖建设, 等. 黄河源区湿地变化与气候变化的关系研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(4): 683—690.
- [1] Li Fengxia, Chang Guogang, Xiao Jianshe, et al. Relationship between wetlands changes and climate change in the Yellow River source region[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(4): 683—690.
- [2] 谭 鹏. 湿地保护与退耕还湿的重要性探讨[J]. 资源节约与环保, 2014, (3): 142—143.
- [2] Tan Peng. Discuss the importance of wetland protection and reversion of cultivated land to wetland[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2014, (3): 142—143.
- [3] 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.
- [3] Ma Yaoming, Osamu Tsukamoto, Wu Xiaoming, et al. Characteristic of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of atmosphere above grassy marshland of the Tibetan plateau area[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(5): 715—722.
- [4] 钱泽雨, 胡泽勇, 杜 萍, 等. 青藏高原北麓河地区近地层能量输送与微气象特征[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 43—48.
- [4] Qian Zeyu, Hu Zeyong, Du Ping, et al. Energy transfer of near surface layer and micrometeorology characteristics in Bailuhe area of Qinghai-Xizang plateau[J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(1): 43—48.
- [5] 陈渭民, 高庆先, 洪 刚. 由 GMS 卫星资料获取我国夏季地表辐射收支[J]. 大气科学, 1997, 21(2): 238—246.
- [5] Chen Weimin, Gao Qingxian, Hong Gang. Estimating surface radiation budgets over China in summer from GMS satellite data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1997, 21(2): 238—246.
- [6] 张 强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征点研究[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 245—254.
- [6] Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or gobi[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(2): 245—254.
- [7] 文小航, 吕世华, 尚伦宇, 等. WRF 模式对金塔绿洲-戈壁辐射收支的模拟研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 346—353.
- [7] Wen Xiaohang, Lyu Shihua, Shang Lunyu, et al. Numerical simulations of radiation budget using WRF model over the Jinta oasis-gobi[J]. Acta Energiac



- Solaris Sinica, 2011, 32(3): 346—353.
- [8] 李英年, 赵 亮, 张法伟, 等. 植物生长季海北高寒湿地辐射收支特征[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 549—555.
- [8] Li Yingnian, Zhao Liang, Zhang Fawei, et al. Characteristics of radiation balance on the alpine wetland in Haibei prefecture of the Qilian mountains in growing season[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 549—555.
- [9] 张宪洲, 王辉明, 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.
- [9] Zhang Xianzhou, Wang Huiming, 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.
- [10] 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.
- [10] Li Yingnian. The study on the radiant energy budget of alpine meadow vegetation in the sunny days during the plant growing season[J]. Acta Agrestia Sinica, 2001, 9(1): 58—63.
- [11] 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.
- [11] 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 Energiae Solaris Sinica, 2003, 24(4): 453—459.
- [12] 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.
- [12] Ma Weiqiang, Ma Yaomin, Hu Zeyong, et al. Analyses on surface radiation budget in northern Tibetan plateau[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(3): 348—352.
- [13] 李红梅, 李 林, 张金旭, 等. 21 前中期三江源地区极端气候事件变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1403—1408.
- [13] Li Hongmei, Li Lin, Zhang Jinxu, et al. Changes in extreme climatic events over the sources of the three river in the prometaphase 21st century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1403—1408.
- [14] 王永生, 盛裴轩, 刘式达, 等. 大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- [14] Wang Yongsheng, Pei Shengxuan, Liu Shida, et al. Atmospheric physics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987.
- [15] 陈世强, 文莉娟, 吕世华, 等. 金塔绿洲不同下垫面辐射特征对比分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(7): 713—718.
- [15] Chen Shiqiang, Wen Lijuan, Lyu Shihua, et al. Analysis of characteristics of radiation on different underlying surface in Jinta oasis[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(7): 713—718.
- [16] 左大康, 周允华. 地球表层辐射研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [16] Zuo Dakang, Zhou Yunhua. The radiation research of earth's surface[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [17] 翁笃鸣. 青藏高原地表净辐射若干重要特征的研究[J]. 南京气象学院学报, 1991, 14(2): 151—159.
- [17] Weng Duming. Some major features of surface net radiation in the Qinghai-Xizang plateau[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1991, 14(2): 151—159.
- [18] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸地区太阳总辐射、植被反射辐射的有关特征[J]. 草地学报, 2002, 10(1): 33—39.
- [18] 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.
- [19] 王 超, 韦志刚, 高晓清, 等. 夏季敦煌稀疏植被下垫面物质和能量交换的观测研究[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 622—628.
- [19] Wang Chao, Wei Zhigang, Gao Xiaoqing, et al. An observation study of surface air exchange and energy budget at a sparse vegetation site of Dunhuang in summer[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(3): 622—628.
- [20] 季国良, 江 灏, 左勇前, 等. 1988 年 9 月张掖地区的太阳辐射状况的初步分析[J]. 高原气象, 1990, 9(2): 194—201.
- [20] Ji Guoliang, Jiang Hao, Zuo Yongqian, et al. A preliminary analysis of the solar radiation condition at Zhangye region during september 1988[J]. Plateau Meteorology, 1990, 9(2): 194—201.
- [21] 王少影, 张 宇, 吕世华, 等. 玛曲高寒草甸地表辐射与能量收支的季节变化[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 605—614.
- [21] Wang Shaoying, Zhang Yu, Lyu Shihua, et al. Seasonal variation characteristics of radiation and energy budgets

- in alpine meadow ecosystem in Maqu grassland [J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(3): 605—614.
- [22] 马伟强, 马耀明, 李茂善, 等. 藏北高原地区地表辐射收支和能量平衡的季节变化[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 673—679.
- [22] Ma Weiqiang, Ma Yaoming, Li Maoshan, et al. Seasonal variation on land surface energy budget and energy balance components in the northern Tibet plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 673—679.
- [23] 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): 324—329.
- [23] Ji Guoliang, Zou Jiling. The seasonal variation of solar radiation budget over oases and desert in arid region [J]. Plateau Meteorology, 1994, 13(3): 324—329.

## AN INITIAL ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF RADIATION BUDGET NEAR GROUND IN ALPINE WETLAND IN SOURCE AREA OF THE YELLOW RIVER

Xie Yan<sup>1,2</sup>, Wen Jun<sup>1</sup>, Liu Rong<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>1</sup>, Jia Dongyu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The characteristics of the diurnal and seasonal variation of the radiation budget and the surface albedo of sunny day was analyzed based on the data collected during the source region of the Yellow River Maduo Xiang surface process observation test near-surface radiation budget observations, which was from June 1, 2014 to May 15, 2015. The result showed that in addition to atmospheric downward longwave radiation, downward solar radiation, ground upward shortwave radiation and upward longwave radiation have obvious diurnal variation. In terms of the annual average of daily amount, the ground upward longwave radiation ( $26.784 \text{ MJ/m}^2$ ) is the largest, followed by the atmospheric longwave downward radiation ( $20.390 \text{ MJ/m}^2$ ), followed by the downward shortwave radiation ( $17.539 \text{ MJ/m}^2$ ), the ground upward shortwave radiation ( $3.888 \text{ MJ/m}^2$ ) is the smallest. In different seasons, each component is minimal in winter, the first two components are the largest in spring and the last two components are the largest in summer. The diurnal and seasonal variation of the typical sunny surface albedo is "U" shape, and the annual average surface albedo was 0.18. The diurnal variation of the surface longwave effective radiation was evident. In the spring, fall and winter the difference between the diurnal averages are not evident. In the summer, it is slightly smaller. In different seasons, surface endothermic value is large and exist big numerical differences during the daytime, but exothermic value is small and exist small numerical differences, and maintain a long time (12-15 h) during the nighttime. The area is a strong heat source during the daytime, a weak cold source during the nighttime and generally a strong heat source.

**Keywords:** solar radiation; atmospheric radiation; radiation flux density; source region of the Yellow River; observation