

参考文献:

- [1] 张桂荣,曹李兴,郑贵生,等.饶平县气象局新旧站址气象资料对经分析[J].广东气象,2012,34(1):63-66.
- [2] 刘盛梅.乌鲁木齐牧业气象试验站迁站前后资料对比分析[J].科技资讯,2010(18):148-161.
- [3] 周昊楠,陈晓燕,王秋香,等.昌吉站迁站对温压降水要素影响的分析[J].沙漠与绿洲气象,2010,4(5):40-43.
- [4] 秦榕,姚作新,王秋香,等.喀什国家基准站迁站前后资料对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(4):55-61.
- [5] 王丽娜,王若升,薛啟,等.甘肃崆峒站新旧址气温对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(1):117-121.
- [6] 王秋香,刘叶,古丽格娜,等.气象站迁站距离及海拔高度差对新旧站资料差异的影响[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(3):1-6.
- [7] 张旭阳,宁海文,杜继稳,等.西安城市热岛效应对夏季高温的影响[J].干旱区资源与环境,2010,24(1):95-101.
- [8] 程玉琴,张少文,尤莉,等.城市热岛效应和迁址对赤峰站温度的影响[J].气象,2009,35(12):98-103.
- [9] 邢向锋.神木迁站前后观测资料对比分析[J].陕西气象,2014(1):21-25.
- [10] 王秋香,刘卫平,刘叶,等.吐鲁番气象站迁移前后资料的差异分析[J].干旱区地理,2016,39(1):22-32.
- [11] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:17-18.
- [12] 马开玉,丁裕国,屠其璞,等.气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社,1993:101-103.

Meteorological Elements Feature Before and After the Relocation of the Korla Meteorological Station and the Reasons for Differences

XIA Xuemei¹, WEI Zhehua², LONG Yonglan¹

(1. Korla Meteorological Bureau, Korla 841000, China;

2.Hami Meteorological Bureau, Hami 839000, China)

Abstract Making a comparative analysis of observational data of the basic meteorological elements that before and after the relocation of the Korla Meteorological Station during 2016–2018, The results show that: (1) in the new station, the annual and monthly values of the average temperature, annual average minimum temperature and monthly average minimum temperature are all lower than that of the old station, which the annual average values are 2.1 °C and 4.1 °C less likely, respectively; the annual average maximum of the air temperatures is equal; the change of the average temperature difference in spring is relatively small, the change of average temperature difference in summer, autumn and winter is relatively large. (2) The monthly average relative humidity of the new station is larger than that of the old station. In all seasons, the average relative humidity difference is the largest in summer, and the annual average relative humidity of the new station is 11% higher than that of the old station. (3) The monthly average atmospheric pressure in the new station is higher than that of the old station, and the annual itaverage atmospheric pressure difference is 3.2 hPa; and the average atmospheric pressure difference in winter is the largest of the all seasons. (4) the annual average wind speed in the new station is 0.2 m/s faster than that in the old station; wind speed in the spring and summer is faster than that in other seasons; the maximum wind speed in the new station is 1.3 to 6.2 m/s larger than that in the old station; which the annual dominant wind direction is changed from ENE to E. (5) The *t*-test revealed that there are significant differences in annual average air temperature, annual average humidity and annual average atmospheric pressure before and after relocation, whereas there is no significant difference in annual average wind speed.

Key words Korla meteorological station; station migration; meteorological elements; difference; cause analysis

范子昂,陆恒,刘兆旭,等.中国天山西部森林积雪短波辐射收支特征[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(5):136-143.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2020.05.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中国天山西部森林积雪短波辐射收支特征

范子昂^{1,2},陆恒³,刘兆旭²,李帅²,武泳柏²

(1.中国气象局树木年轮理化研究重点实验室/新疆树木年轮生态实验室,新疆 乌鲁木齐 830002;2.新疆金锋华云气象科技有限公司,新疆 乌鲁木齐 830002;3.四川师范大学地理与资源科学学院,四川 成都 610101)

摘要: 基于中国科学院天山积雪与雪崩研究站不同开阔度森林下积雪表面短波辐射的观测资料,分析了森林积雪短波辐射收支、短波辐射透射率特征。结果表明:阴坡林下积雪表面短波辐射小于阳坡,且随森林开阔度的减小而减小;林下雪面短波辐射和净短波辐射随太阳高度角增加而逐渐增加,不同开阔度林下雪面短波辐射和净短波辐射的差异也随太阳高度角的增加而增大;阳坡、阴坡林冠上方和80%开阔度林下雪面短波辐射在晴天日变化呈单峰型,峰值出现时间由林冠上方直接辐射和散射辐射的相对关系决定;多云天气,短波辐射的日变化特征取决于云量的变化;日平均短波辐射透射率随林冠开阔度和太阳高度角的增加而增加,且开阔度越大,其增加速率越快,短波辐射透射率日变化呈“U”型,早晚大于中午。

关键词: 天山;森林积雪;短波辐射;短波辐射透射率

中图分类号: P422.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0799(2020)05-0136-08

积雪径流作为干旱区径流的重要组成部分,对区域生态环境和工农业生产具有十分重要和特殊的意义^[1]。新疆是西北干旱区的主体,地表水资源匮乏,但季节性积雪水资源丰富,占全国季节性积雪水资源总量的三分之一^[2]。积雪的积累和消融过程既受到温度、湿度等气象因子的影响,也受到植被类型和覆盖度等下垫面因子的影响。在森林积雪中,由于林冠和地形的影响,林冠下积雪的辐射平衡^[3-4]、积雪物理特性和雪层结构与开阔地积雪有明显的不同^[5-6]。这些区别影响着山地生态系统、气候条件和冻土状况以及冰雪水文过程^[7-9]。短波辐射和长波辐射是林下积雪消融最重要的能量来源^[10-11]。因此,

开展森林下积雪表面的短波辐射特征观测和研究,对开展与水资源管理、土地利用、洪水预警等密切相关的融雪径流预测具有重要意义^[12]。

由于植被冠层对短波辐射的吸收、反射和散射,削弱了林下雪面接受的短波辐射量^[13-15]。在早前相对密闭森林的辐射传输研究中,通常简单地考虑树冠覆盖度和立木密度^[16],如 Beer 定律可以很好地模拟直接辐射和散射在稀疏落叶林中的传输^[17-19]。Ross^[20]和 Jarvis^[21]等通过叶面积和树叶角度的分布来描述短波辐射在冠层中的传输。Li^[22]、Ni^[23]、Roujean^[24]和 Pomeroy 等^[25]则结合几何光学和辐射传输过程来描述植被对短波辐射的吸收和传输过程以及林下雪面短波辐射的空间分布。丛者福^[26]、郝帅^[27]、吉春容等^[28]曾对天山林区小气候进行过观测,但是对太阳辐射的研究较少;吉春容等^[15]对天山中段雪岭云杉林区辐射特征进行了观测研究,但是对天山森林下积雪短波辐射特征观测分析较少。因此,本文根据中国科学院天山积雪与雪崩研究站(以下称积雪站)不同开阔度森林下雪面的短波辐射观测数据,分析森林积雪短波收支特征以及植被拦截降雪对林下积雪

收稿日期:2019-08-10;修回日期:2020-03-05

基金项目:国家自然科学基金(41741014, 41401089);中国科学院西部之光—西部博士项目(2015-XBQN-B-24);中央级公益性科研院所基本科研业务费(IDM2016007)

作者简介:范子昂(1982—),男,高级工程师,主要从事树木年轮研究和防雷检测工作。

通信作者:陆恒(1986—),男,讲师,主要从事积雪水文方面的研究工作。E-mail:luhengwzs@163.com

辐射的影响,可为森林积雪积累和消融等水文过程的研究提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

积雪站(43°16'N,83°16'E,1776 m)位于天山西部巩乃斯河谷的中山森林带,站区多年平均气温为1.3℃,1月和7月的月平均温度分别为-14.4℃和13.8℃,多年平均降水量为867.3 mm,其中冬季固态降水量占年降水量的30%以上,多年最大积雪深度平均值为78 cm,最大为152 cm(2000年),稳定积雪期可长达半年。积雪站所在地是天山中山带的典型代表,选择该地区的积雪作为研究对象具有普遍意义。研究区域地形破碎,切割深度400~600 m,坡度较大,区域内森林主要分布在阴坡,阳坡为山地草原^[29]。天山中山森林带的主要树种是雪岭云杉(*Picea schrenkiana*),群落结构简单,是以雪岭云杉为建群种的单优势植物群落。主林层由天山雪岭云杉构成,郁闭度大,由于光照限制,林下灌草层均不发达^[30]。

1.2 研究方法

2013年2月26日—4月26日对积雪站阳坡(积雪站气象观测场)、阴坡开阔度分别为20%、80%的森林积雪表面短波辐射和反射辐射进行观测,2012年11月2—4日对开阔度分别为20%、30%、40%和80%的森林林冠下短波辐射进行观测。利用鱼镜头拍摄林分全天空照片,对拍摄的照片应用Gap Light Analyzer (GLA Version 2.0)软件进行分析,从而获得林冠开阔度等参数。采用TRM-ZS2型自动气象站(锦州阳光气象科技有限公司)对阳坡和不同开阔度林冠下气温(精度为±0.1℃),湿度(精度为±0.2%),短波辐射和反射辐射(精度<5%)进行观测,采样间隔为10 min,阴坡林冠上方短波辐射观测采用以下方法计算:

$$S_{0\downarrow} = E_s + E_d + E_{adj} \quad (1)$$

式中, $S_{0\downarrow}$ 为林冠上方短波辐射, E_s 为地面接收的直接辐射, E_d 为地面接收的散射辐射, E_{adj} 为由于周围地形的反射作用产生的附加辐射,以上3量的单位为 $W \cdot m^{-2}$ 。当观测(计算)地点与山脊线的仰角小于太阳高度角时,观测地点 $E_s=0$,其它情况则根据

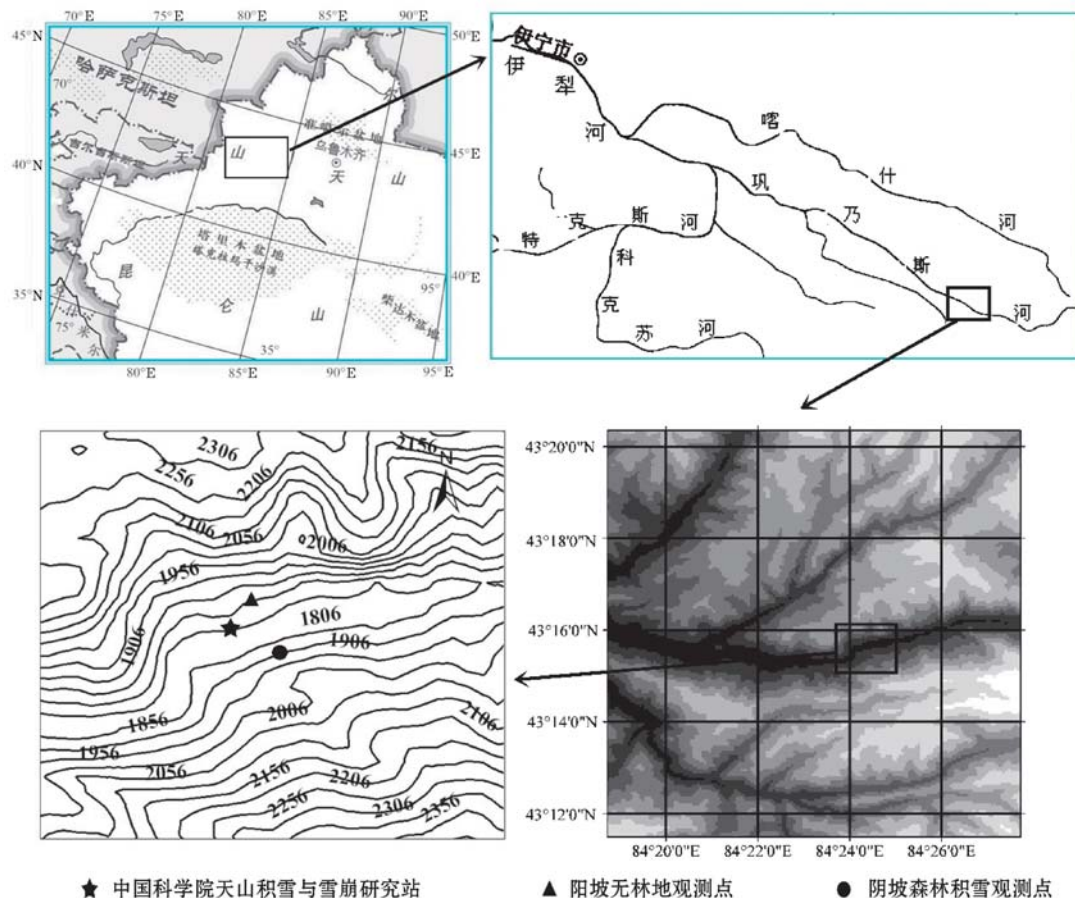


图1 研究区地形和观测点示意图

太阳常数、大气透明度系数、太阳赤纬、观测点纬度、太阳时角、太阳天顶角、方位角、坡度、坡向和云量等参数计算^[31],其中云量 f_c 公式如下:

$$f_c = 0.832 \exp \left(\frac{RH_{700} - 100}{41.6} \right), \quad (2)$$

式中, RH_{700} 为700 hPa高度大气相对湿度。

$$E_d = V_f I_0 d_r \theta \cos Z_s, \quad (3)$$

式中, I_0 为太阳常数, d_r 为地球轨道偏心率订正因子^[32], Z_s 为太阳天顶角, θ 为地面接收散射辐射比例,根据晴空指数、大气温度和大气相对湿度计算^[33], V_f 为天空视角因子。

$$V_f = \frac{A_{sky}}{\frac{\pi}{2}}, \quad (4)$$

式中, A_{sky} 为天空视角。根据本研究区的地形特征,假设本研究区的地形为阳坡和阴坡的坡度相等的“V”型河谷。根据Yokoyama^[34]等人提出的天空视角计算方法:

$$A_{sky} = \frac{(2\pi - 2\arctan \frac{\tan \alpha}{\sqrt{2}} - \varphi)}{4}. \quad (5)$$

周围地形产生的附加辐射与地形和周围地形的反射率有密切关系,采用Dozier^[30]的简化近似计算方法,只考虑地形坡度、天空视角因子和周围地形的平均反射率作用。

$$E_{adj} = C_i \rho_{mean} (E_s + E_d), \quad (6)$$

式中, C_i 为地形结构参数, ρ_{mean} 为周围地形平均反射率。

$$C_i = \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} - V_f \right). \quad (7)$$

图2显示了积雪站阳坡在2012年10月29日—11月9日,2013年2月26日—4月30日的计算小时瞬时短波辐射和实测小时瞬时短波辐射。结果表明上述方法能较好地模拟复杂地形的短波辐射。模拟误差主要是由于云量计算所导致的,由于研究区地形复杂,云量对辐射的影响尤为显著。

2 结果与分析

2.1 森林积雪日平均短波辐射特征

图3显示研究区复杂地形和植被等特征使不同下垫面雪面短波辐射收支具有明显差异。随太阳高度角增加,雪面入射短波辐射不断增加,但受天气影响,雪面入射短波辐射日际变化显著。由于研究区谷地狭窄^[29],使阳坡入射短波辐射明显大于阴坡树冠上的短波辐射(图3a),如2013年2月26日—4月

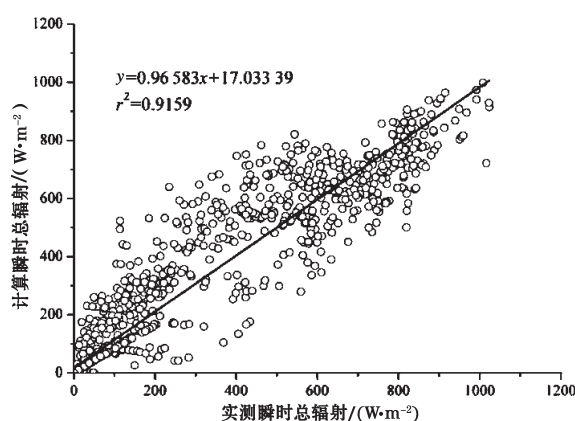


图2 实测小时瞬时短波辐射与计算
瞬时短波辐射对比

26日,阳坡和阴坡林冠上方的瞬时短波辐射平均值分别为219.29、180.52 $W \cdot m^{-2}$ 。但是随太阳高度的增加以及太阳方位角与坡向相对关系的变化,阳坡和阴坡林冠上方短波辐射差值逐渐减小。植被冠层对短波辐射的吸收、反射和散射等作用,使林下雪面入射短波辐射差异大于林冠上方。例如,在观测期,80%和20%开阔度森林积雪表面接收的瞬时短波辐射平均值分别为62.26、14.43 $W \cdot m^{-2}$ 。受入射短波辐射的影响,不同地点雪面反射辐射和入射短波辐射有相同的关系和变化趋势。阳坡和阴坡森林积雪表面的反射辐射均随时间逐渐减小,且都有相同的变化特征(图3b~3d)。阳坡、80%和20%开阔度森林的累积净短波辐射平均值分别为9.72、2.56、0.70 $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。随天文辐射增加以及雪面反射率的减小,雪面的净短波辐射不断增加。阳坡、80%和20%开阔度林下雪面累积净短波辐射增加速率分别为0.318 8、0.130 4、0.033 6 $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ (图4),进而使得阳坡的融雪开始时间早于林下,同时3个观测点的融雪速率差异随时间也逐渐增大。

2.2 森林积雪短波辐射日变化特征

由于受地形遮挡、大气散射,同时由于林冠对短波辐射的吸收和反射等作用,改变了森林积雪表面短波辐射日变化特征。尤其到融雪后期,随着夜间气温和雪层含水率的增加,雪面短波辐射的日变化将显著影响融雪速率的日变化特征。图5显示了不同时期各观测点积雪表面入射短波辐射日变化特征。晴天阳坡和阴坡森林积雪的短波辐射随时间增加(图3,图5),阳坡、林冠上方以及80%开阔度森林积雪表面短波辐射日变化呈单峰型。阳坡短波辐射在14时出现峰值,阴坡林冠上方除3月2日外,峰

值时间也均为 14 时(图 5a),这是由于天空散射辐射在短波辐射中比例较大。除 4 月 21 日外,大气和植被冠层的散射作用,使 80%开阔度林下积雪表面短波辐射峰值出现时间均为 16 时。随太阳高度角增加,阴坡直接辐射在短波辐射中的比例不断增加,使 4 月 21 日 80%开阔度林下积雪表面短波辐射峰值时间提前到 15 时。20%开阔度林下雪面短波辐射的日变化特征与阳坡和 80%开阔度林下明显不同,其短波辐射较小,且日变化较复杂,从 3 月 29 日开始呈现为明显的双峰或者三峰型(图 5)。出现这种情况可能是由于 20%开阔度森林植被茂密,林下积雪表面的太阳直接照射出现光斑,而在本实验中林下

只有一只短波辐射表进行测量,因此短波辐射的小时值出现较大波动。在 3 月 2 日和 3 月 17 日,阴坡林冠上方接收直接辐射较少,20%开阔度林下雪面短波辐射主要受大气的散射辐射和周围地形的反射辐射影响,因此未出现明显峰值。随太阳高度和太阳方位角的变化,阳坡、阴坡林冠上方以及 80%开阔度林下雪面的短波辐射与阳坡雪面短波辐射差异逐渐减小,尤其是 3 月 29 日之后,其瞬时最大短波辐射能超过 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 5c)。20%开阔度林下短波辐射虽随时间增加,但与 80%开阔度林下和阳坡雪面短波辐射差异逐渐增大,如 4 月 5 日其瞬时短波辐射最大值为 $151.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,分别比 80%开阔度林

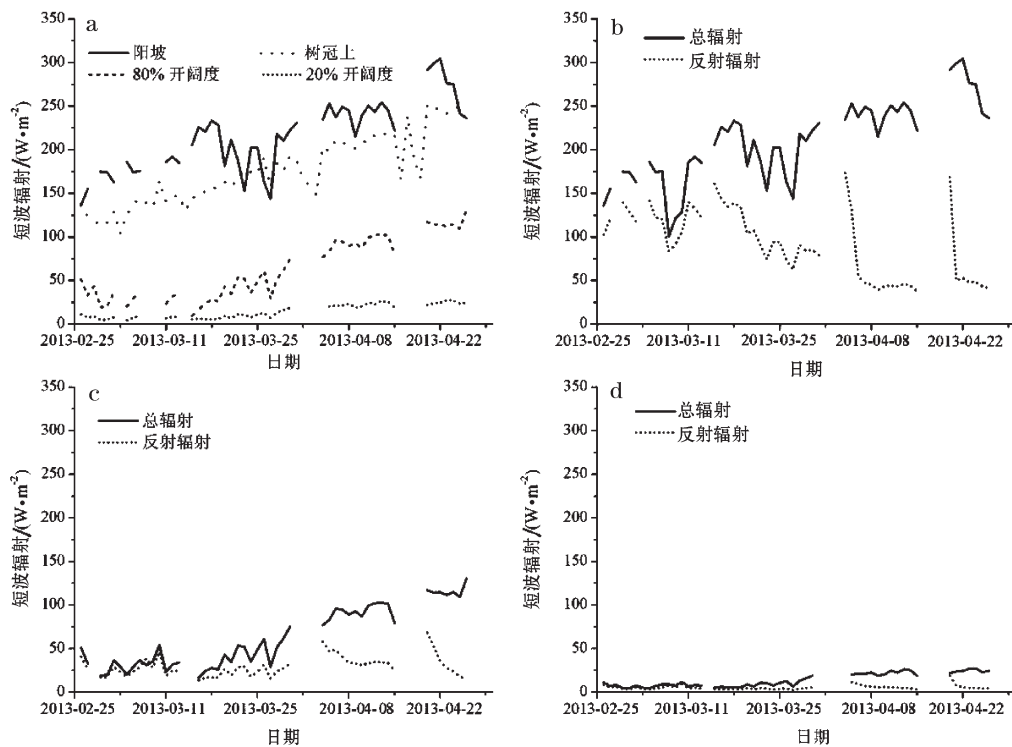


图 3 不同地点短波辐射收支日平均变化特征

(a 为不同地点入射短波辐射;b 为阳坡短波辐射日平均;c 为 80%林冠开阔度短波辐射;
d 为 20% 林冠开阔度短波辐射)

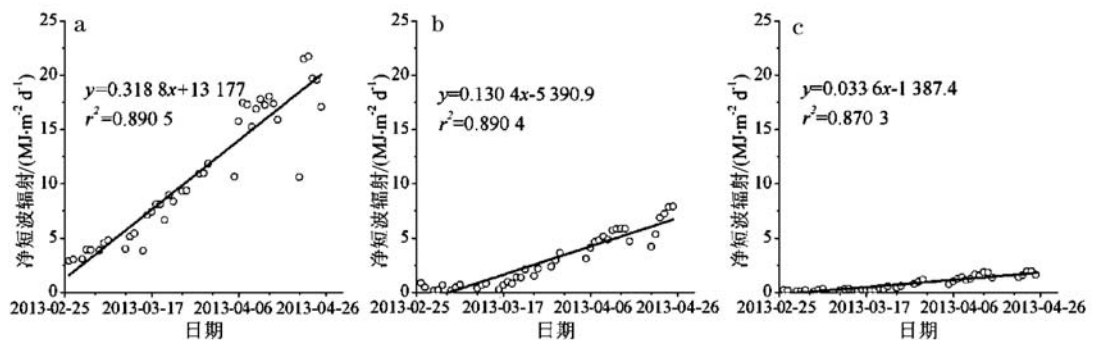


图 4 不同森林覆盖度下雪面净短波辐射增加速率

下和阳坡低 116.65、430.33 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

多云天入射短波辐射明显小于晴天。云量的增加导致直接辐射减少和散射辐射增加从而改变雪面接收的短波辐射及其日变化特征。雪面短波辐射的日变化特征和云量有密切的关系,例如3月4日12—18时为阴天(云量=10),没有形成明显的峰值(图6a),而4月1日中午的云量=6,所以短波辐射虽减小,但日变化仍为单峰型(图6c)。在多云天气,在20%开阔度森林积雪表面短波辐射的日变化特征明显区别于晴天,由于林下光斑减少,其日变化未呈现双峰或三峰型,而是与太阳直接辐射影响较小的晴天一致(图5a~5b,图6)。

2.3 植被对短波辐射透射的影响

通常用短波辐射透射率(τ)表示植被对短波辐射的削弱作用,其值用林冠上方的入射短波辐射和林下雪面入射短波辐射的比值表示:

$$\tau = \frac{S_u \downarrow}{S_0 \downarrow}, \quad (8)$$

式中 $S_u \downarrow$ 为森林下雪面入射短波辐射, $S_0 \downarrow$ 为林冠

上方入射短波辐射, $S_u \downarrow$ 和 $S_0 \downarrow$ 的单位均为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

图7a显示了2012年11月2—4日20%、30%、40%和80%开阔度森林的短波辐射透射率的日变化。该时期阴坡直接辐射较小,即使晴天直接辐射也小于散射辐射。例如11月2—4日林冠上方最大瞬时直接辐射为 $159.48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 瞬时散射辐射为 $235.19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 林下几乎无直接辐射,光斑导致的测量误差较小,林下雪面短波辐射日变化均呈现单峰型,因此林下雪面短波辐射和植被短波辐射透射率的日变化能反映其基本变化规律。林冠的短波透射率随植被开阔度的增加而增加,20%、30%、40%和80%开阔度森林的平均短波辐射透射率分别为0.036 4、0.079 8、0.096 3和0.213 0。早晚短波辐射透射率高于中午,日变化呈“U”型。11月3日12—17时4个地点的短波辐射透射率均小于0.11,80%开阔度森林早晨和傍晚的短波辐射透射率均>0.4,30%和40%最大超过0.2。其原因可能是由于早晚受地形作用的影响,阴坡没有太阳直接辐射,阴坡林冠上方短波辐射只有大气散射和临近地表的反射辐

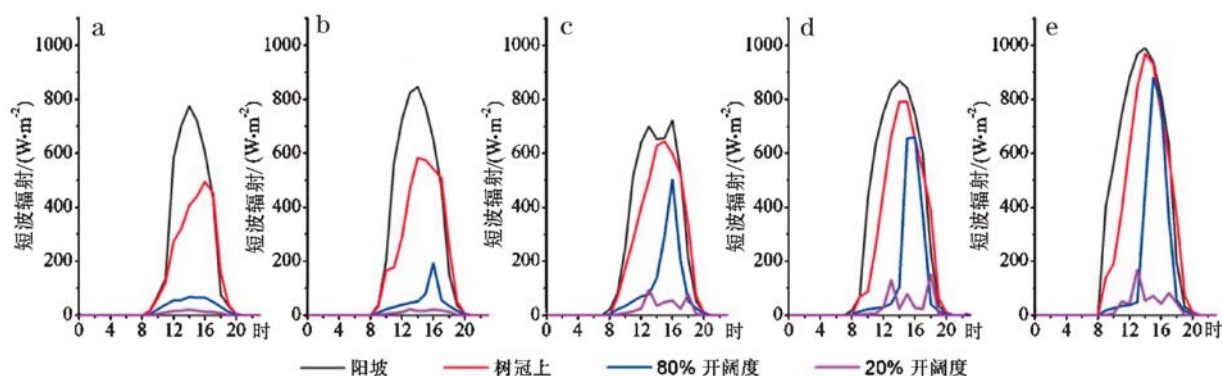


图5 不同时期晴天森林积雪短波辐射特征

(a为2013年3月2日,b为2013年3月17日,c为2013年3月29日,d为2013年4月5日,e为2013年4月21日)

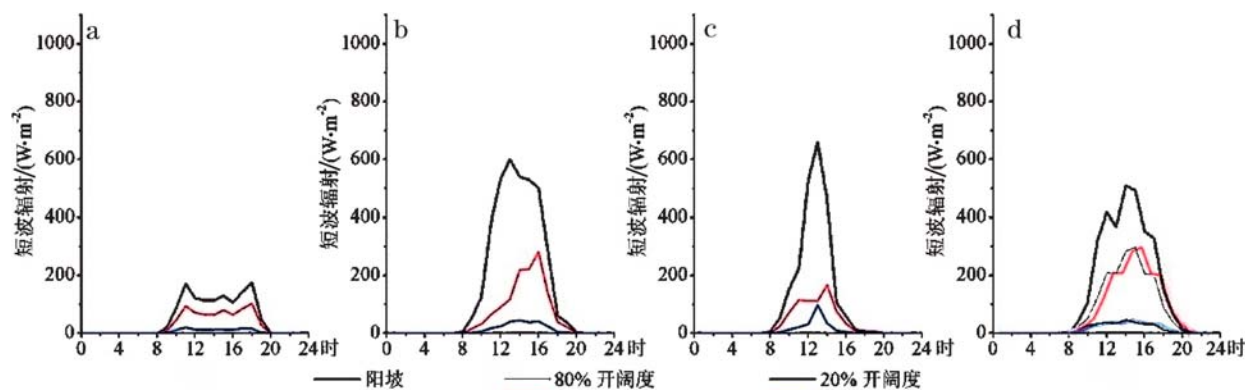


图6 不同时期多云天森林积雪短波辐射特征

(a为2013年3月4日,b为2013年3月23日,c为2013年4月1日,d为2013年4月17日)

射,使得短波辐射值较小;12—17时阴坡直接辐射和散射辐射均明显增加,短波辐射显著增加(图5~6)。例如11月2日11时和18时阴坡林冠上方瞬时短波辐射分别为 $31.20, 26.49 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,12时和17时其短波辐射分别为 $236.92, 210.40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。此外,早晚太阳辐射在林冠中的穿透路径长度大于正午时刻,也是早晚短波辐射透射率高于中午的原因之一。随着太阳高度角的增加,阴坡林冠上方的直接辐射和短波辐射逐渐增加,林下积雪表面接收的短波辐射也逐渐增加,更多的直接辐射能透过空隙直接到达雪面,同时随着阴坡短波辐射中直接辐射的比例不断增加,植被短波辐射透射率也逐渐增加。图7b显示了80%和20%开阔度森林日平均短波辐射透射率随时间逐渐增加,其增加速率分别为 $0.0028, 0.0008 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。不同森林开阔度日平均短波辐射透射率增加速率的差异,也是导致了该时期不同开阔度林下积雪表面入射短波辐射以及融雪期融雪速率差异增加的原因之一。

3 结论

基于中国科学院天山积雪与雪崩研究站不同开

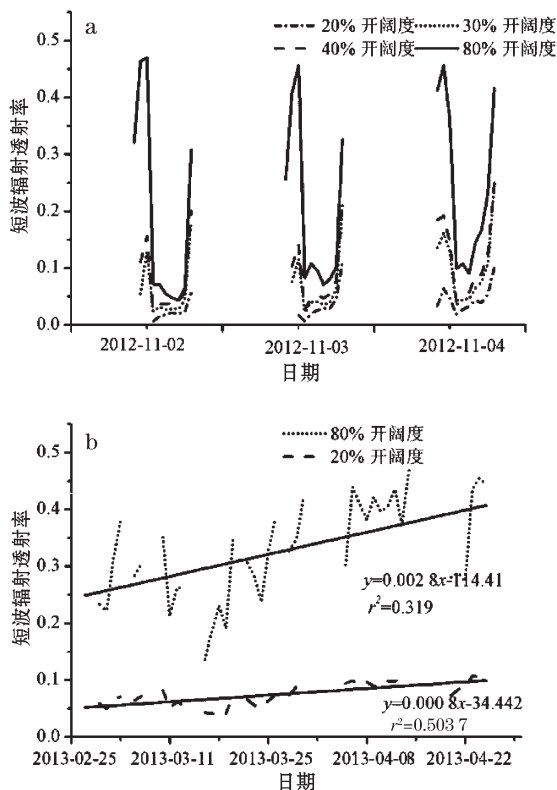


图7 2012年11月2—4日不同森林林冠开阔度短波辐射透射率(a)和2013年3月26日—4月26日短波辐射透射率日变化(b)

阔度森林下积雪表面短波辐射的观测资料,分析了森林积雪短波辐射收支、短波辐射透射率特征。得出如下结论:

(1) 阳坡的短波辐射明显大于阴坡树冠上的短波辐射,但随着太阳高度角的增加差异逐渐减小。由于植被冠层对短波辐射的吸收、反射和散射等作用,林下积雪表面入射短波辐射远小于阳坡和冠层上方,森林开阔度越大,林下雪面入射短波辐射越大。阳坡和阴坡林下积雪表面反射辐射均随时间逐渐减小。随天文辐射的增加以及雪面反射率的减小,雪面的净短波辐射不断增加。虽然森林开阔度越大,雪面反射率越高,但阳坡、80%和20%开阔度森林的累积净短波辐射增加速率分别为 $0.3188, 0.1304, 0.0336 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(2) 晴天阳坡和森林积雪的短波辐射随时间逐渐增加,阳坡、林冠上方以及80%开阔度森林积雪表面短波辐射均呈单峰型,阳坡峰值出现时间和直接辐射出现时间一致,而阴坡和林下积雪表面短波辐射峰值出现时间则由直接辐射和散射辐射的大小关系而决定。由于仪器观测误差导致20%开阔度林下积雪入射短波辐射日变化呈现复杂的双峰或者三峰型。随着太阳高度角增加,阳坡、阴坡林冠上方和80%开阔度林下积雪表面短波辐射的差异逐渐减小,但与20%开阔度森林却不断增加。在多云天气,阳坡和森林积雪表面入射短波辐射小于晴天,其日变化特征主要取决于云量的变化,不一定表现为单峰型。

(3) 短波辐射透射率随林冠开阔度增加而增加;由于研究区地形对直接辐射的遮挡作用导致短波辐射中直接辐射、散射辐射和周围地表反射辐射占比日变化特征,以及短波辐射在林冠中穿透路径长度日变化特征,使透射率的日变化呈“U”形;日平均短波辐射透射率随太阳辐射的增加而增加,且开阔度越大增加速率越大。

参考文献:

- [1] 包安明,陈晓娜,李兰海.融雪径流研究的理论与方法及其在干旱区的应用[J].干旱区地理,2010,33(5):684-691.
- [2] 李培基.中国积雪资源初步评价[J].地理学报,1998,43(2):108-119.
- [3] Hedstrom N R, Pomeroy J W. Accumulation of intercepted snow in the boreal forest: measurement modeling [J]. Hydrological Processes, 1998, 12: 1966-19623.
- [4] NIU G Y, YANG Z L. Effects of vegetation canopy processes on snow surface energy and mass balances [J]. Journal of

- Geophysical Research, 2004, 109, D23111.
- [5] 陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 中国天山西部季节性森林积雪雪层温度[J]. 地理科学, 2011, 31(12): 1541–1548.
 - [6] 陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 中国天山西部季节性积雪物理特性[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1403–1409.
 - [7] Murray C D, Buttle J M. Impacts of clearcut harvesting on snow accumulation and melt in a northern hardwood forest [J]. Journal of Hydrology, 2003, 271: 197–212.
 - [8] 焦剑, 谢云, 林燕, 等. 东北地区融雪期径流及产沙特征分析[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 333–344.
 - [9] 韩茜, 刘明哲, 陆恒. 融雪期中国天山西部山地表层积雪能量收支特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(3): 39–46.
 - [10] Link T E, Marks D. Point simulation of seasonal snow cover dynamics beneath boreal forest canopies [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (D22): 27841–27857.
 - [11] Sicart J E, Essery R, Pomeroy J W, et al. A sensitivity study of daytime net radiation during snowmelt to forest canopy and atmospheric conditions [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(5): 774–784.
 - [12] Ellis C R, Pomeroy J W. Estimating sub-canopy shortwave irradiance to melting snow on forested slopes [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(19): 2581–2593.
 - [13] Harding R, Pomeroy J. The energy balance of the winter boreal landscape [J]. Journal of Climate, 1996, 9: 2778–2787.
 - [14] 李伟平, 孙淑芬, 刘新, 等. 阿尔卑斯山杉林冠层影响辐射传输的个例分析[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 749–756.
 - [15] 吉春容, 邹陈, 范子昂, 等. 天山中段雪岭云杉林区辐射特征分[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 82–88.
 - [16] Reifsnyder W E, Lull H W. Radiant energy in relation to forests [M]. US Dept. of Agriculture, Forest Service; For sale by the Superintendent of Documents, US Govt Print Off, 1965.
 - [17] Federer C. Solar radiation absorption by leafless hardwood forests[J]. Agricultural Meteorology, 1972, 9: 3–20.
 - [18] Link T, Marks D. Distributed simulation of snowcover mass and energy balance in the boreal forest [J]. Hydrological Processes, 1999, 13(14): 2439–2452.
 - [19] 李聪, 李良序. 浅述植被双向反射模型[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(2): 57–60.
 - [20] Ross J. Radiative transfer in plant communities [J]. Vegetation and the Atmosphere, 1975, 1: 13–55.
 - [21] Jarvis P, James G, Landsberg J. Coniferous forest [J]. Vegetation and the Atmosphere, 1976, 2: 171–240.
 - [22] LI X, Strahler A H, Woodcock C E. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 466–80.
 - [23] NI W, LI X, Woodcock C E, et al. Transmission of solar radiation in boreal conifer forests: measurements and models [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (D24): 29555–29566.
 - [24] Roujean J. Two-story Equations of Transmission of Solar Energy (TSETSE) in open boreal conifer tree stands [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104 (D22): 27869–27879.
 - [25] Pomeroy J, Ellis C, Rowlands A, et al. Spatial variability of shortwave irradiance for snowmelt in forests [J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(6): 1482–1490.
 - [26] 丛者福. 天山北坡中部林区天山云杉林小气候观测[J]. 新疆农业大学学报, 1997, 20(3): 23–28.
 - [27] 郝帅, 刘萍, 张毓涛, 等. 天山中段天山云杉森林小气候特征研究[J]. 新疆农业大学学报, 2007, 30(1): 48–52.
 - [28] 吉春容, 尚华明, 范子昂, 等. 天山中段雪岭云杉森林冬春季小气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(3): 1–5.
 - [29] 胡汝骥, 马虹, 姜逢清. 中国天山积雪雪崩站区的地理环境[J]. 干旱区地理, 1997, 20(2): 25–33.
 - [30] 张震, 刘萍, 丁易, 等. 天山云杉林物种组成及其种群空间分布格局 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2010, 34(5): 157–160.
 - [31] 田辉, 文军, 马耀明, 等. 复杂地形下黑河流域的太阳辐射计算[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 666–676.
 - [32] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. 气象学报, 1963, 33(1): 78–95.
 - [33] 韩佳音, 李胜功, 张雷明, 等. 江西千烟洲地区散射辐射的模拟与验证[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 2991–2999.
 - [34] Yokoyama R, Shirasawa M, Pike R J. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002, 68(3): 257–266.

Characteristics of Shortwave Radiation to Snow Beneath Forest Canopies of the Western Tianshan Mountains, China

FAN Zi'ang^{1,2}, LU Heng³, LIU Zhaoxu², LI Shuai², WU Yongbo²

(1.Key Laboratory of Tree-Ring Physical and Chemical Research of CMA/Key Laboratory of Tree Ring Ecology of Xinjiang, Urumqi 830002, China;

2.Xinjiang Jinfeng Huayun Meteorological Technology Co. Ltd., Urumqi 830002, China;

3.College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

Abstract: Downward and upward shortwave radiation beneath different canopy openness forest was measured in Tianshan Research Station for Snow-cover and Avalanche of Chinese Academy of Sciences. The variation of shortwave radiation beneath forest canopy, shortwave transmissivity and the influence of intercept snow above forest crown on shortwave were analyzed. The results showed the downward shortwave radiation beneath forest canopy were less than that on the sunny slope, it decreased with canopy openness decreased. The downward and net shortwave radiation beneath forest canopy increased with solar elevation angle increased, and the difference of downward and net shortwave radiation beneath forest canopy between different canopy openness forests also increased with solar elevation angle. In clear day, the daily variation of downward shortwave radiation in sunny slope, above forest canopy and beneath 80% canopy openness forest presented single peak type, and the peak time was determined by relative proportion of direct shortwave radiation and diffuse shortwave radiation. In cloudy day, the variation of downward shortwave radiation was mainly influenced by cloud cover. The sparser the forest was, the bigger the shortwave transmissivity was. The daily average of shortwave radiation increased with solar elevation angle increased. The sparser the forest was, the more the shortwave transmissivity increase. The daily variation of shortwave transmissivity presented "U" type, the value of shortwave transmissivity in the morning and evening were bigger than that in the period of 12:00—17:00.

Key words: Tianshan Mountains; forest snow; shortwave radiation; shortwave transmissivity