

文章编号: 1008-2786-(2020)1-009-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000486

青藏高原腹地多年冻土区地表反照率的季节变化及主要影响因子

孙琳婵^{1,2,3}, 赵 林^{2,3*}, 李 韧^{2,3}, 肖 瑶^{2,3}

(1. 陇东学院 历史与地理学院, 甘肃 庆阳 745000; 2. 中国科学院西北资源环境研究院 冰冻圈科学
国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国科学院青藏高原冰冻圈研究站, 兰州 730000)

摘 要: 准确获取青藏高原地表反照率的季节变化特征对高原地表能水循环研究具有重要意义。本文利用青藏高原多年冻土区西大滩和唐古拉 2007 年的气象及辐射数据, 运用相关分析方法研究了太阳高度角、积雪及活动层冻融过程对地表反照率变化的影响。结果显示: 冷暖季降雪过程中地表反照率的变化差异较明显; 地表无积雪覆盖期间, 地表反照率与气温和表层土壤含水量呈反相关关系。利用多元回归分析法构建了以积雪日数和气温为影响因子的月均地表反照率计算回归方程, 经检验与观测值对比平均相对误差为 7.1%, 可用于青藏高原北部地表反照率的估算。

关键词: 青藏高原; 冻融过程; 地表反照率; 季节变化; 回归方程

中图分类号: K903

文献标志码: A

地表反照率是表征陆地表面反射太阳辐射能力的参数, 在天气和气候模拟及预报中发挥着重要作用^[1-3]。目前大部分全球气候模式 (General Circulation Models, GCM) 中地表反照率的相对误差一般在 5% ~ 15% 之间^[4], 从而导致陆面过程模拟中有关能量平衡模拟的误差较大。由于受太阳高度角、下垫面状况以及气象条件等因素的影响, 地表反照率的时空差异性较大^[5], 其 1% 的数量变化导致系统能量的改变几乎等效于太阳常数的变化^[1]。因此, 研究地表反照率季节变化及其主要影响因子, 以此提出更准确的地表反照率参数化方案有助于提高各种陆面模式模拟精度, 对研究区域及全球陆面能水循环具有重要意义。

青藏高原多年冻土分布广泛, 其独特的水热特征对整个高原地区能水循环有着重要影响。活动层

的冻融过程强烈地改变地表土壤含水量及上覆植被状况, 从而导致地表反照率发生季节性变化^[6]。国内外不少学者从不同角度对影响地表反照率变化的因子进行了分析研究^[7-10], 但大多数气候和陆面过程中仍然采用传统的参数化方案作为获取地表反照率的重要手段^[11-12], 且多数取值为经验关系式乃至常数^[13-14]。观测研究表明, 青藏高原多年冻土区太阳高度角、积雪日期和深度及土壤湿度因子对地表反照率的影响较大^[15-17], 即使是不同时期的积雪, 反照率的差异也较大。一般来讲, 反照率在新雪的积累期最高, 稳定期和消融期次之^[18], 同时也表现出随积雪深度增加而增大的趋势^[19]。近十多年来, 不同学者针对青藏高原多年冻土区地表反照率的参数化方案进行了研究^[20-24], 但仍然没有给出理想的参数化方案。本研究选取位于多年冻土区北界的西

收稿日期 (Received date): 2019-05-26; 改回日期 (Accepted date): 2019-12-30

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41671070)。[National Natural Science Foundation of China (41671070)]

作者简介 (Biography): 孙琳婵 (1984-), 女, 甘肃庆阳人, 理学硕士, 讲师, 主要研究方向: 寒区气候与模拟。[SUN Linchan (1984-), female, born in Qingyang, Gansu province, M. Sc., lecturer, research on cold climate and simulation] E-mail: sunlinchan2007@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 赵林 (1966-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 冻土、寒区气候与环境、寒区土壤。[ZHAO Lin (1966-), male, Ph. D., professor, specialized in permafrost, cold climate and environment] E-mail: linzhao@lzb.ac.cn

大滩和腹地的唐古拉为研究区域,分析了太阳高度角、积雪及活动层冻融过程对地表反照率的影响,并以此为基础构建了多年冻土区月均地表反照率计算方案,为进一步改进多年冻土区陆面过程中地表反照率参数化方案提供依据。

1 研究区域、研究数据和研究方法

研究区域资料选取中国科学院青藏高原冰冻圈观测研究站的西大滩和唐古拉两个综合观测场的观测资料^[25]。西大滩综合观测场(35°43'N,94°49'E,海拔 4538 m)位于青藏高原大片连续多年冻土区北界(见图 1),多年冻土厚度薄,年平均气温约为 -4.0℃,年降水量 372.4 mm,降水多集中于 5 月—9 月,观测场附近植被类型为高寒草甸,植被覆盖度在 60%~70% 之间。唐古拉综合观测场(33°04'N,91°56'E,海拔 5100 m)地处连续多年冻土区(见图 1),活动层厚度约 3 m,年平均气温约为 -4.4℃,年降水量 384.8 mm,降水多集中于 5 月—9 月,观测场附近植被类型为退化较为严重的高寒草甸,植被覆盖度在 20%~30% 之间。

研究数据选取西大滩和唐古拉综合观测场 2006—2007 年的气象要素及短波辐射数据,表 1 为研究观测项目及观测仪器基本概况^[25],采样数据每 0.5 h 记录 1 次,记录时间以北京时间为准。选用数据可靠,序列完整。

表 1 研究观测项目及观测仪器基本概况^[25]

Tab. 1 Overview of observation projects and instruments at the target observatory stations

测量项目	仪器型号	安装高度/深度
气温、湿度	HMP45C-L/Vaisala 温湿探头	2、5、10 m
雪深	SR50	2 m
向上/下短波	CM3 Pyranometer	2 m
向上/下长波	CG3 Pyranometer	2 m
土壤含水量	CS616 Water Content Reflectometers	5、10、20 cm
地温	Model 105T Thermocouple Probe	2、5、10、20、40 cm

地表反照率采用向上短波辐射与向下短波辐射之比。利用相关分析法对多年冻土区影响地表反照率季节变化的因子进行分析,根据 2007 年辐射和气象观测数据采用多元回归分析方法建立计算月均地表反照率的回归方程,并利用 2006 年观测数据进行

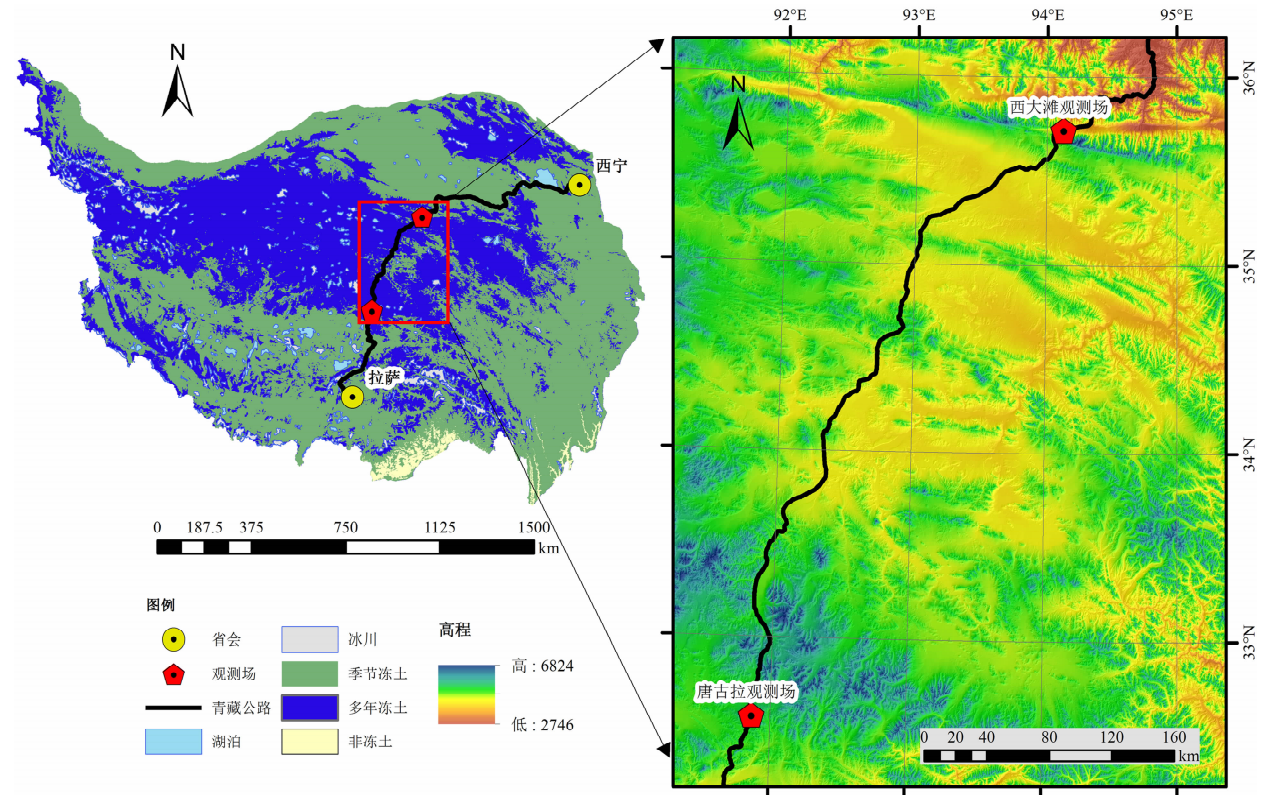


图 1 研究区域观测场地理位置

Fig. 1 Location of the study area observation stations in china

适用性检验。研究中采用统计软件 SPSS13.0 进行数据处理,制图采用软件 Origin8.0。

2 结果与分析

2.1 太阳高度角对地表反照率变化的影响

地表反照率的变化主要受太阳高度角、积雪、植被、地形及土壤含水量等因子的影响^[5]。太阳高度角是关于纬度、经度、时角、时间的函数,对于同一地点,太阳高度角是时间的函数。图2为研究地区四季典型晴天日的地表反照率日变化图,从图中可以看出,太阳高度角早晚较小时的地表反照率早晚变化大,而中午前后比较平缓,从日出至日落呈现“U”型。已有研究表明,当太阳高度角大于 40° 时,该研究区地表反照率基本不再随太阳高度角的变化发生显著变化^[22],图中11:00至17:00(北京时间)期间地表反照率的变化幅度小于0.01也证明了这点。因此利用研究地区11:00至17:00时间段内的短波辐射观测的平均值作为计算地表反照率日平均值。

2.2 冷暖季降雪对地表反照率变化的影响

由于高原暖季降水形式多变,时有降雪事件发生^[26],对地表反照率的影响也较大。从图3可以看出,西大滩和唐古拉地区月均地表反照率与月积雪日数变化趋势几乎一致。唐古拉地区暖季降水量较多,降水形式主要为降雨,故地表反照率在暖季降低,而西大滩地区暖季降水量多,但降雪较多,地表反照率在暖季也较大。高原冷季降水量很少,但积雪在地表覆盖时间较长,导致冷季时地表反照率较

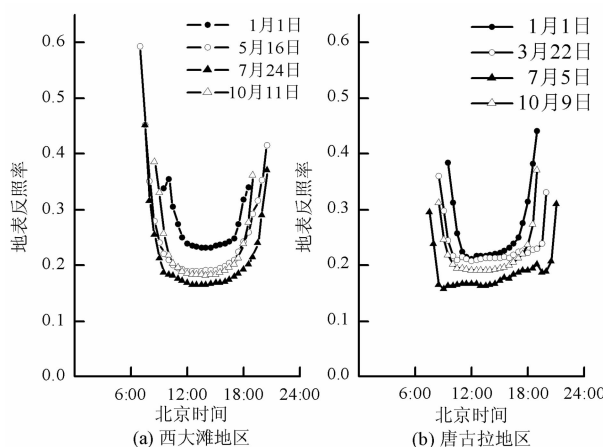


图2 四季典型晴天日地表反照率的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of the surface albedo on typical sunny days in four seasons

大。可以看出,地表积雪状况是影响反照率的首要因子。

从积雪形成直到其完全消融的整个连续过程中,积雪的特征随时间延续发生着极大的变化^[27],地表反照率也随之发生变化。有研究表明,积雪反照率与雪密度和雪中含冰量呈正相关,与雪中含水量呈负相关^[19,28]。青藏高原腹地积雪的消融与日照时数、雪的形态、消融程度、升华过程等均有一定关系^[19,28-29],而积雪深度则是降水相态、降雪量、降雪强度、气温、地温和风速等近地面多种气象要素共同作用的结果^[30]。为研究不同时段积雪对地表反照率的影响,分别选取研究地区三次较明显降雪过程中雪深与地表反照率的变化进行分析(见图4)。三次降雪过程中,当地表开始有新降雪时,反照率明显增大;随着降雪过程的持续、积雪厚度的增加,地

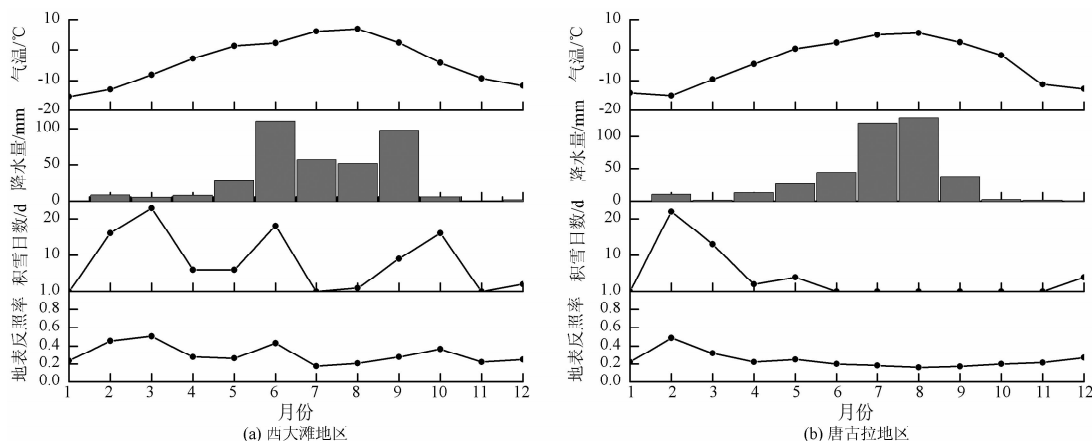


图3 月均气温、降水量、积雪日数、地表反照率变化

Fig. 3 Monthly average variation of temperature, precipitation, snow days and surface albedo

表反照率呈现增大趋势;降雪停止,积雪消融,厚度变薄,反照率随之降低;随积雪的消失,地表反照率恢复至降雪前的状态。降雪过程中地表反照率的变化在冷季和暖季表现也不同,暖季降水量较多,降雪过程也伴随着持续的积雪融化过程,最大雪深尽管高于 10 cm,但随气温回升积雪消融,积雪覆盖时间较短,地表反照率随雪深的降低逐渐减小,积雪完全消融时土壤含水量已增多,地表湿润且加深土壤颜色,使地表反照率一般都略低于降雪前的地表反照率(见图 4a、图 4b)。冷季降水量少,最大雪深不足

10 cm,由于气温较低,积雪覆盖持续时间较长,初降新雪时地表反照率明显增大,积雪覆盖期间其随雪深降低逐渐变小(见图 4c)。

2.3 多年冻土活动层冻融过程中地表反照率的变化特征

无积雪时段的地表反照率主要取决于地表土壤和覆被特征,不同类型的土壤、土壤含水量及地表植被的变化均会导致地表反照率发生变化^[31]。研究地区表层土壤含水量有着显著的季节变化过程,暖季增多,冷季减少,与地表反照率的变化趋势相反,且多年冻土区活动层冻融过程势必会影响浅层土壤含水量的变化,进而影响地表反照率的变化。

研究地区无积雪状态下地表反照率均小于 0.3,这也与已有研究结果一致^[32]。为研究多年冻土区地表反照率在表层土壤冻融过程中的变化规律,根据日最大雪深剔除地表有积雪覆盖的时段。采用 Guo 等^[33]的方法,将冻土分为土壤完全冻结期、消融期、完全消融期、冻结期四个时段,分别研究活动层冻融过程中地表反照率的变化特征。表 2 为研究地区 2007 年 5 cm 土层冻融过程中各时段持续日数,由表 2 可知一年中有多于 1/3 天数为土层完全冻结期,有多于 1/2 天数土层处于消融期和完全消融期,土壤的冻结期持续天数最短,西大滩地区仅有 10 d 为冻结期,唐古拉地区冻结期也仅有 1 月。

表 2 西大滩和唐古拉地区 5 cm 土壤冻融阶段日数(单位:d)

Tab. 2 Days of 5 cm soil freezing and thawing in Xidatan and Tanggula (Unit: d)

观测点	完全冻结期	消融期	完全融化期	冻结期
西大滩	153	97	105	10
唐古拉	136	79	120	30

图 5 为研究区域 5 cm 土层冻融各时段地表反照率和土壤含水量的变化状况。由图可知在消融期和完全消融期,浅层土壤融化,增加土壤含水量,地表反照率与土壤含水量呈现较明显的反向变化;西大滩地区冻结期持续时间较短,土壤含水量与地表反照率变化均较为稳定,而唐古拉地区冻结期较长,地表反照率随土壤日冻融土壤含水量的变化呈反向变化;完全冻结期地表反照率与土壤含水量同样呈现反向变化,但变化较小,这与张乐乐等的研究结果一致^[6]。由于研究区域冻土活动层冻融过程中冻

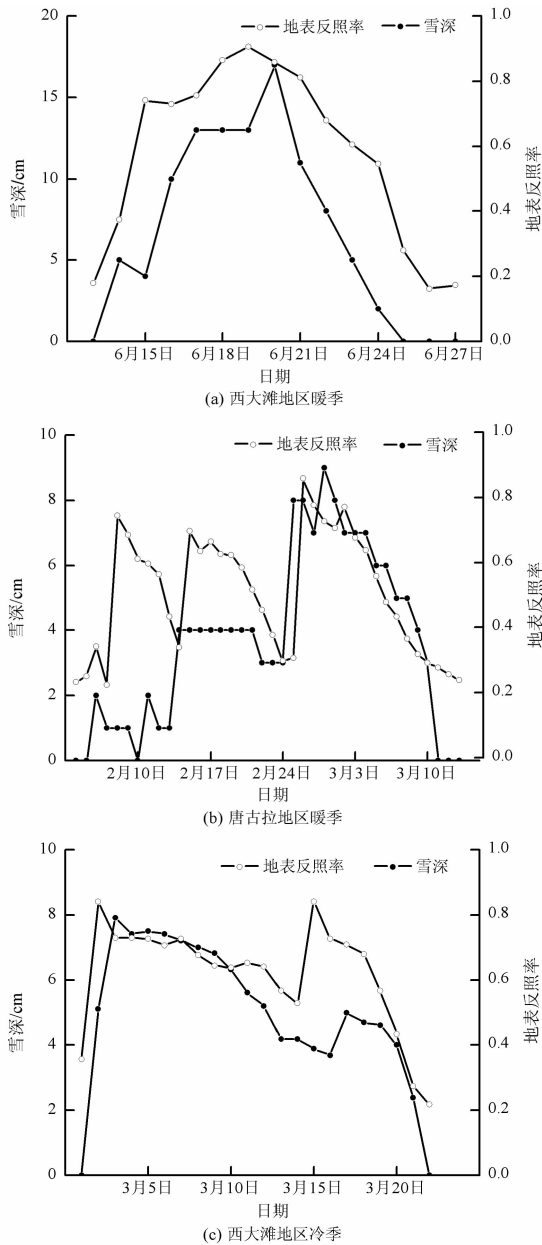


图 4 三次典型降雪过程日最大雪深与地表反照率变化

Fig. 4 Variations of daily maximum snow depth and surface albedo in the three typical snowfalls

结期均相对较短,因此以下研究将活动层冻融过程中的四个阶段合并为冻结期(完全冻结期和冻结期)和消融期(完全消融期和消融期)来研究冻融过程中地表反照率的变化特征。

2.3.1 土壤消融期地表反照率的变化特征

地表无积雪覆盖的土壤消融时段,随着气温的回升,降水的增多,地表植被逐渐发育增大覆盖度,增强了对太阳辐射的吸收,地表反照率降低。这与

高原多年冻土区地表植被的生长发育状况密切相关,主要表现为随高原暖季的开始,气温逐渐回升至5月末,冻土活动层开始从地表向下逐渐融化,植被逐渐进入生长期,7月下旬至8月初达到植被生长的茂盛期,9月末植被逐渐枯黄,生长过程渐趋停止。

冻土消融期地表土壤含水量状况对地表反照率有着显著影响。对研究地区土壤含水量(5 cm 土层)、气温与地表反照率进行相关性分析,结果如表

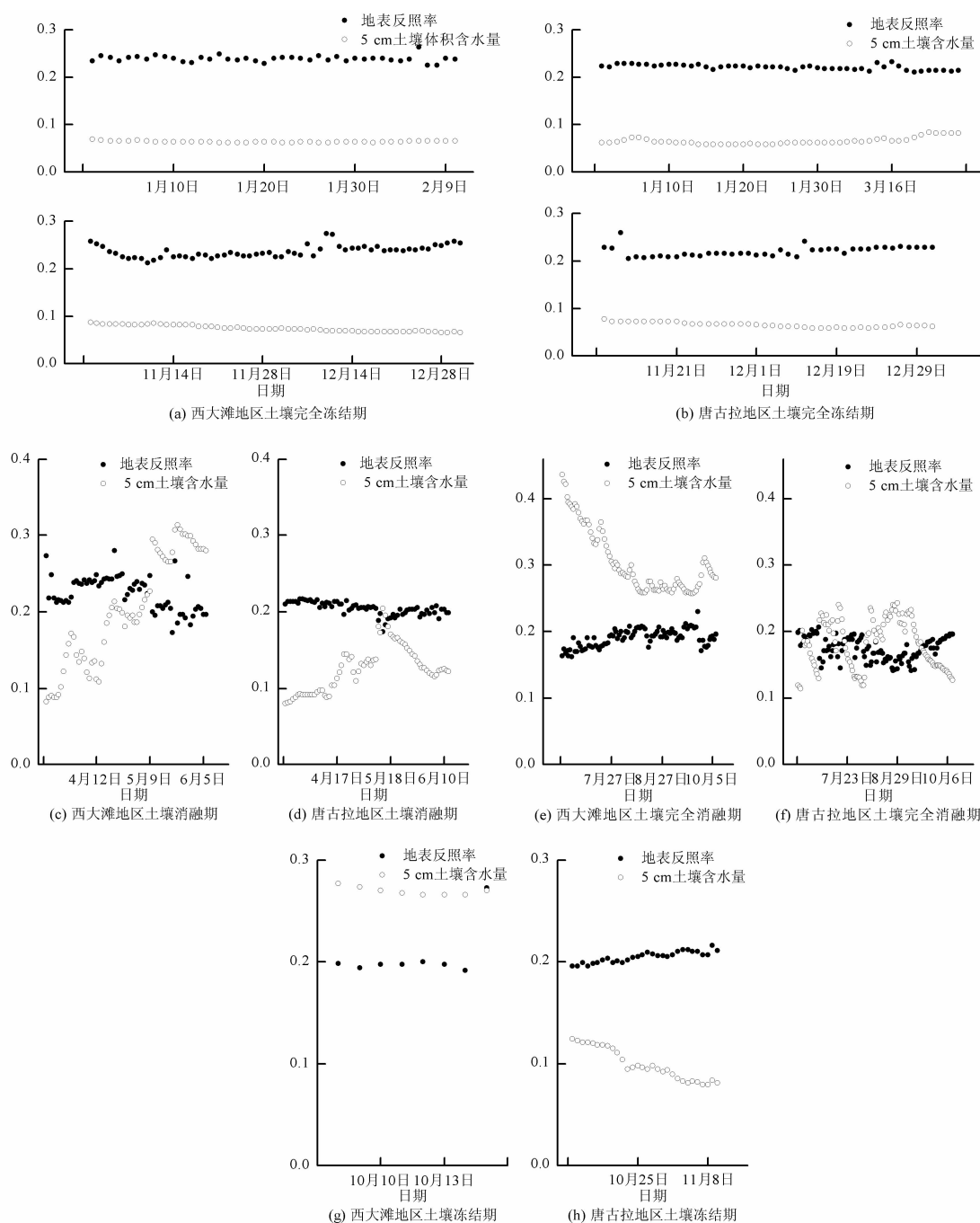


图5 活动层冻融过程中地表反照率和土壤含水量的变化

Fig. 5 Variations of surface albedo and soil moisture in active layer freezing and thawing process

3 所示,各相关性均通过置信水平 0.01 的显著性检验。由相关系数可知,气温升高到一定程度土壤消融,地表含水量增多,加深地表土壤颜色,同时地表植被又处于生长期,这些都增强了地表对太阳短波辐射的吸收,导致反照率降低,而且地表植被覆盖度越小(唐古拉地区),土壤含水量对地表反照率的影响就越明显。

2.3.2 土壤冻结期地表反照率的变化特征

土壤冻结状态下土壤含水量随温度的降低呈指数减小^[31,34]。活动层冻结期土壤含水量(5 cm 土层)、气温与地表反照率的相关性分析如表 4 所示,各相关性均通过置信水平 0.01 的显著性检验。由相关系数可知,地表反照率与土壤含水量、气温均呈反相关关系,当气温降低到一定程度表层土壤发生冻结,地表植被也逐渐停止生长直到枯死,土壤含水量降低,减少了太阳辐射的吸收,使地表反照率增大。

2.4 多年冻土区地表反照率变化的函数构建分析

多年冻土区活动层冻融过程中各时段的区分主要依据温度变化,由分析可知地表无积雪时,地表反照率与气温变化呈反相关关系^[25]。当地表有积雪时,地表反照率明显增大,但暖季地表积雪完全消融后,表层土壤含水量明显增多,地表反照率却降低^[25],由表 3、表 4 可知气温与土壤含水量呈显著的正相关关系,依据多元回归分析方法,回归方程构建中要求影响因子之间相互独立,因此在青藏高原多年冻土区,利用影响因子积雪和气温描述地表反照率的变化,即用积雪日数、气温两个常规气象观测项目构造如下函数关系:

$$\alpha = f(\frac{n}{N}, T_a, \theta) \quad (1)$$

式中, α 为地表反照率; n 为某月的积雪日数; N 为该月的实际日数; n/N 为月相对积雪日数; T_a 为气温; θ 为常数^[25,35]。

经多元回归分析法得出西大滩、唐古拉研究地区的回归方程分别为式(2)、式(3):

$$\alpha = 0.376(\frac{n}{N}) - 0.003T_a + 0.196 \quad (2)$$

$$\alpha = 0.318(\frac{n}{N}) - 0.002T_a + 0.192 \quad (3)$$

利用式(2)、式(3)计算地表反照率月平均值; n/N 为月相对积雪日数; T_a 为气温选用月平均值^[25,35]。式(2)的复相关系数为 0.99, $F = 221.40$, 式(3)的复相关系数为 0.99, $F = 201.23$, 回归方程

在置信水平 0.01 上查 $F(2,9) = 8.02$ 可知均通过 F 检验是显著的。研究地区地表反照率的实测值与式(2)、式(3)的计算值比较,平均绝对误差均为 0.01,西大滩、唐古拉地区的平均相对误差分别为 3.5%、4.5%^[25]。西大滩和唐古拉地区均属多年冻土区,因此构造多年冻土区地表反照率计算的回归方程如下:

$$\alpha = 0.365(\frac{n}{N}) - 0.002T_a + 0.194 \quad (4)$$

式(4)的复相关系数为 0.98, $F = 313.87$, 在置信水平 0.01 上查 $F(2,21) = 5.78$ 可知通过 F 检验是显著的。图 6 为研究地区地表反照率利用式(4)的计算值与实测值变化图,由图可知地表反照率计算值和实测值变化趋势一致且数值符合,平均绝对误差均为 0.02,平均相对误差西大滩、唐古拉地区分别为 5.1%、5.3%^[25]。

表 3 消融期土壤含水量、气温、地表反照率的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient among soil moisture, air temperature and surface albedo in thawing season

研究区域	土壤含水量	气温	地表反照率
西大滩地区	土壤含水量	1	0.69 **
	气温		1
	地表反照率		1
唐古拉地区	土壤含水量	1	0.60 **
	气温		1
	地表反照率		1

注:** 在 0.01 水平上显著相关。

表 4 冻结期土壤含水量、气温、地表反照率的相关系数

Tab.4 Correlation coefficient among soil moisture, air temperature and surface albedo in freezing season

研究区域	土壤含水量	气温	地表反照率
西大滩地区	土壤含水量	1	0.67 **
	气温		1
	地表反照率		1
唐古拉地区	土壤含水量	1	0.76 **
	气温		1
	地表反照率		1

注:** 在 0.01 水平上显著相关。

为了检验式(4)在多年冻土区的适用性,运用研究区域 2006 年气象及辐射数据计算月均地表反

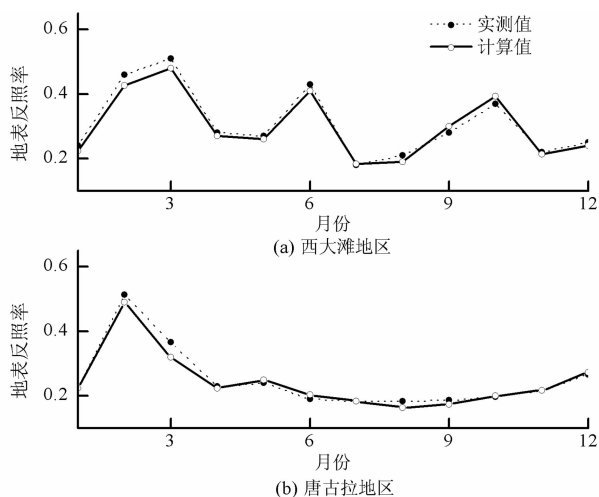


图6 2007年月均地表反照率的实测值和计算值对比图

Fig. 6 Comparison of measured and calculated monthly average surface albedo in 2007

照率^[25],结果如图7所示,月均地表反照率计算值和实测值变化趋势一致且数值吻合较好,误差分析平均绝对误差为0.02,平均相对误差为7.1%。因此运用积雪日数和气温计算月均地表反照率是可行的,式(4)可用于藏北高原多年冻土区月均地表反照率的估算^[25]。

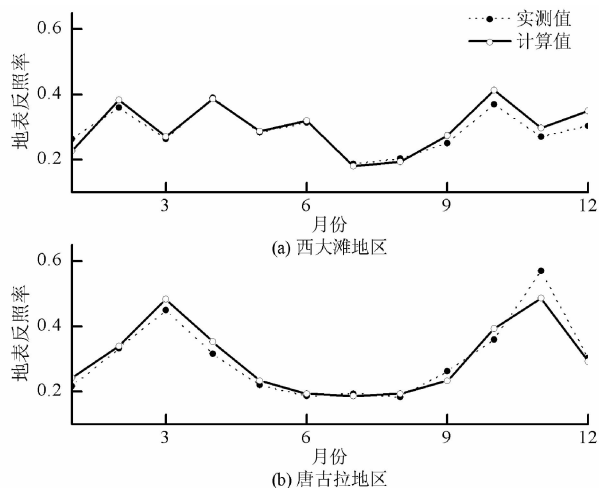


图7 2006年月均地表反照率的实测值和计算值对比图

Fig. 7 Comparison of measured and calculated monthly average surface albedo in 2006

3 讨论

多年冻土区活动层的冻融过程对地表反照率产生重要影响,但研究区域西大滩和唐古拉的活动层

冻融过程、土壤含水量、土壤质地、植被生长期和覆盖状况等均有差异,这使得式(4)的计算值与西大滩地区2月—3月、唐古拉地区3月的观测值吻合度较低^[25]。

积雪明显地影响地表反照率变化,而高原暖季降雪伴随着融雪过程,且积雪在地表覆盖时间较短,使地表反照率变化更加复杂。但本研究将积雪作为影响地表反照率变化主要影响因子时,运用积雪日数单一指标具有局限性,而且统计中只要地表有积雪存在时积雪日数为1 d,忽略了不同积雪时期反照率的差异性^[25],以期进一步细化积雪时期为地表反照率参数化方案提供理论依据。

4 结论

(1)积雪是影响地表反照率明显变化的重要因子,多年冻土区冷暖季降雪过程中地表反照率的变化差异较明显。暖季降水量较多且最大雪深高于10 cm,但暖季降雪过程也伴随着积雪融化过程,地表反照率随着雪深的降低逐渐减小,且积雪完全消融地表湿润,土壤含水量增多加深了土壤颜色,地表反照率一般都略低于降雪前的地表反照率;冷季降水量少且最大雪深不足10 cm,积雪覆盖持续时间较长,地表反照率随雪深降低逐渐减小。

(2)当地表无积雪覆盖时,多年冻土区活动层的冻融过程明显地影响地表反照率。在活动层消融期和完全消融期,表层土壤含水量增多,使地表反照率降低;但西大滩地区冻结期较短,土壤含水量保持稳定,地表反照率变化较为稳定,而唐古拉地区冻结期相对较长,地表反照率随土壤日冻融土壤含水量的变化呈反向变化;在完全冻结期地表反照率与土壤含水量同样呈现反向变化,但变化较小。因此,经相关分析地表反照率与气温、土壤含水量变化均呈反相关关系,且相关性均在0.01置信水平上通过显著性检验。

(3)经分析利用积雪日数和气温常规气象观测项目建立计算月均地表反照率的回归方程,经 F 检验在置信水平0.01上是显著的,且计算值与观测值对比,平均相对误差为7.1%,适用于青藏高原北部多年冻土区月均地表反照率的计算。

版权申明:本文是在第一作者学位论文《降水事件对多年冻土区地表水热特征的影响研究》基础

上的后续研究,虽然采用原文的数据,但在研究方法、思路与公式上进行了优化。硕士论文版权归属原培养单位中国科学院西北生态环境资源研究院(原中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)。特此申明。

参考文献 (References)

- [1] PALTRIDGE G W, PLATT C M R. Radiative process in meteorology and climatology [M]. North Holland: Elsevier, 1976: 84.
- [2] 沈志宝,左洪超. 青藏高原地面反射率变化的研究[J]. 高原气象, 1993, **12**(3): 294 – 301. [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]
- [3] 薛华柱,张国东,周红敏,等. 几种典型地表类型反照率时序变化特征及其参数化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, **55**(2): 271 – 283. [XUE Huazhu, ZHANG Guodong, ZHOU Hongmin, et al. Time series variation characteristics and parameterization of land surface albedo in several typical land cover types [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, **55**(2): 271 – 283]
- [4] DORMAN J L, PIERS J S. A global climatology of albedo, roughness length and stomata resistance for atmospheric general circulation models as represented by the simple biosphere model SIB [J]. Journal of Applied Meteorology, 1989, **28**(9): 833 – 855.
- [5] 肖登攀,陶福祿,MOIWO J P. 全球变化下地表反照率研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, **26**(11): 1217 – 1224. [XIAO Dengpan, TAO Fulu, MOIWO J P. Research progress on surface albedo under global change [J]. Advances in Earth Science, 2011, **26**(11): 1217 – 1224]
- [6] 张乐乐,赵林,李韧,等. 青藏高原唐古拉地区暖季土壤水分对地表反照率及其土壤热参数的影响[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(2): 351 – 358. [ZHANG Lele, ZHAO Lin, LI Ren, et al. Investigating the influence of soil moisture on albedo and soil thermodynamic parameters during the warm season in Tanggula Range, Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, **38**(2): 351 – 358]
- [7] 王澄海,董文杰,韦志刚. 陆面模式中土壤冻融过程参数化研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, **17**(1): 44 – 52. [WANG Chenghai, DONG Wenjie, WEI Zhigang. The development of study on the soil freezing-thaw process in land surface model [J]. Advance in Earth Sciences, 2002, **17**(1): 44 – 52]
- [8] 樊宪磊,阎宏波,瞿瑛. HJ-1A/B CCD 地表反照率估算方法比较与验证[J]. 国土资源遥感, 2019, **31**(3): 123 – 131. [FAN Xianlei, YAN Hongbo, QU Ying. Comparison and validation of the methods for estimating surface albedo from HJ-1A/B CCD data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, **31**(3): 123 – 131]
- [9] YAN Minshuai, JEFFREY G M, GAO Feng. An algorithm for the retrieval of 30 m snow free albedo from landsat surface reflectance and MODIS B-RDF [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, **115**(9): 2204 – 2216.
- [10] HE Tao, LIANG Shunlin, WANG Dongdong, et al. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+ and OLI data based on the unified direct estimation approach [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, **204**: 181 – 196.
- [11] 张振宇,李小玉,孙浩. 地表反照率不同计算方法对于干旱区流域蒸散反演结果的影响——以新疆三工河流域为例[J]. 生态学报, 2019, **39**(8): 2911 – 2921. [ZHANG Zhenyu, LI Xiaoyu, SUN Hao. Influence of different surface albedo calculation methods on the simulation of evapotranspiration from the Sangong River Basin in the arid region of Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(8): 2911 – 2921]
- [12] 张强,胡向军,王胜,等. 黄土高原陆面过程实验研究(LOPEX)有关科学问题[J]. 地球科学进展, 2009, **24**(4): 16 – 24. [ZHANG Qiang, HU Xiangjun, WANG Sheng, et al. Some technological and scientific issues about the experimental study of land surface processes in Chinese Loess Plateau (LOPEX) [J]. Advances in Earth Science, 2009, **24**(4): 16 – 24]
- [13] 蔡福,周广胜,明惠青,等. 地表反照率动态参数化对陆-气通量模拟的影响:以东北玉米农田为例[J]. 气象学报, 2012, **70**(5): 1149 – 1164. [CAI Fu, ZHOU Guangsheng, MING Huiqing, et al. A simulative study of effects of dynamic parameterization of surface albedo on land-atmosphere flux exchanges: A case study of rainfed maize field in northeast China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, **70**(5): 1149 – 1164]
- [14] ZHONG Qiang, WU Aisheng. On the relationship between planetary and surface albedo: model's comparison and validation [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995, **9**(4): 402 – 411.
- [15] IDSO S B, JACKSON R D, REGINATO R J. The dependence of bare soil albedo on soil water content [J]. Journal of Applied Meteorology. 1975, **14**: 109 – 113.
- [16] HOLLONAY J L, MANABE S. Simulation of climate by a global general circulation model I: hydrological cycle heat balance [J]. Monthly Weather Review, 1971, **99**: 335 – 370.
- [17] 沈志宝. 青藏高原冬季降雪对地面净辐射的影响[J]. 高原气象, 1996, **15**(4): 397 – 403. [SHEN Zhibao. The influence of snow on the surface net radiation over Qinghai – Xizang Plateau in winter [J]. Plateau Meteorology, 1996, **15**(4): 397 – 403]
- [18] 刘豪,肖鹏峰,张学良,等. 东北地区积雪反照率特性[J]. 冰川冻土, 2019, **41**(3): 554 – 562. [LIU Hao, XIAO Pengfeng, ZHANG Xueliang, et al. The characteristics of snow cover albedo in northeast China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, **41**(3): 554 – 562]
- [19] 张海宏,苏永玲,姜海梅,等. 积雪升华过程对高寒湿地气相互作用的影响[J]. 冰川冻土, 2018, **40**(6): 1223 – 1230. [ZHANG Haihong, SU Yongling, JIANG Haimei, et al. Influence of snow subliming process on land-atmosphere interaction at alpine

- wetland [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, **40**(6): 1223 – 1230]
- [20] 刘辉志, 涂钢, 董文杰. 半干旱区不同下垫面地表反照率变化特征[J]. 中国科学, 2008, **53**(10): 1220 – 1227. [LIU Huizhi, TU Gang, DONG Wenjie. Variation characteristics of surface albedo in different underlying surfaces in semi-arid areas [J]. Science in China Press, 2008, **53**(10): 1220 – 1227]
- [21] LI Ying, HU Zeyong. A study on parameterization of surface albedo over grassland surface in the northern Tibetan Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, **26**(1): 161 – 168.
- [22] 肖瑶, 赵林, 李韧, 等. 藏北高原多年冻土区地表反照率特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(3): 480 – 488. [XIAO Yao, ZHAO Lin, LI Ren, et al. The characteristics of surface albedo in permafrost regions of northern Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(3): 480 – 488]
- [23] 杨成, 姚济敏, 赵林, 等. 藏北高原多年冻土区地表反照率时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(6): 1518 – 1528. [YANG Cheng, YAO Jimin, ZHAO Lin, et al. Temporal and spatial variation characteristics of surface albedo in permafrost region of northern Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, **38**(6): 1518 – 1528]
- [24] 姚济敏, 谷良雷, 赵林, 等. 多年冻土区与季节冻土区地表反照率对比观测研究[J]. 气象学报, 2013, **71**(1): 176 – 184. [YAO Jimin, GU Lianglei, ZHAO Lin, et al. Comparatively observation study of the surface albedo between frost region and the seasonally frozen soil region [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, **71**(1): 176 – 184]
- [25] 孙琳婵. 降水事件对多年冻土区地表水热特征的影响研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2010: 7 – 9, 19 – 20, 56 – 57. [SUN Linchan. The research on precipitation influencing on the hydrothermal characteristics of the ground in permafrost region [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute (CAREERI), Chinese Academy of Science (CAS), 2010: 7 – 9, 19 – 20, 56 – 57]
- [26] 周利敏, 陈海山, 彭丽霞, 等. 青藏高原冬春雪深年代际变化与南亚高压可能联系[J]. 高原气象, 2016, **35**(1): 13 – 23. [ZHOU Limin, CHEN Haishan, PENG Lixia, et al. Possible connection between interdecadal variations of snow depth in winter and spring over Qinghai-Xizang Plateau and South Asia High in summer [J]. Plateau Meteorology, 2016, **35**(1): 13 – 23]
- [27] 姚闯, 吕世华, 王婷, 等. 黄河源区多、少雪年土壤冻融特征分析[J]. 高原气象, 2019, **38**(3): 474 – 483. [YAO Chuang, LV Shihua, WANG Ting, et al. Analysis on freezing-thawing characteristics of soil in high and low snowfall years in source region of the Yellow River [J]. Plateau Meteorology, 2019, **38**(3): 474 – 483]
- [28] 张海宏, 肖建设, 陈奇, 等. 青海省甘德两次降雪过程的微气象特征分析[J]. 气象, 2019, **45**(8): 1093 – 1103. [ZHANG Haihong, XIAO Jianshe, CHEN Qi, et al. Micro-meteorological characteristics analysis of two snowfall processes in Gande of Qinghai Province [J]. Meteorological Monthly, 2019, **45**(8): 1093 – 1103]
- [29] 周扬, 徐维新, 白爱娟, 等. 青藏高原沱沱河地区动态融雪过程及其与气温关系分析[J]. 高原气象, 2017, **36**(1): 24 – 32. [ZHOU Yang, XU Weixin, BAI Aijuan, et al. Dynamic snow-melting process and its relationship with air temperature in Tuotuohe, Qinghai-Xizang [J]. Plateau Meteorology, 2017, **36**(1): 24 – 32]
- [30] 杨成芳, 刘畅. 一次江淮气旋暴雪的积雪特征及气象影响因子分析[J]. 气象, 2019, **45**(2): 191 – 202. [YANG Chengfang, LIU Yang. Study on snow cover and its meteorological influence factors of Jianghuai cyclone snowstorm [J]. Meteorological Monthly, 2019, **45**(2): 191 – 202]
- [31] 李国平, 肖杰. 青藏高原西部地面反射率的日变化以及与若干气象因子的关系[J]. 地理科学, 2007, **27**(1): 63 – 67. [LI Guoping, XIAO Jie. Diurnal variation of surface albedo and relationship between surface albedo and meteorological factors on the western Qinghai-Tibet Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, **27**(1): 63 – 67]
- [32] 沈志宝. 藏北地区冬季降雪对地面反射率的影响[J]. 高原气象, 1996, **15**(2): 165 – 171. [SHEN Zhibao. The influence of snowfall on the surface albedo in the northern XiZang (Tibet) in winter [J]. Plateau Meteorology, 1996, **15**(2): 165 – 171]
- [33] GUO Donglin, YANG Meixue, WANG Huijun. Sensible and latent heat flux response to diurnal variation in soil surface temperature and moisture under different freeze/thaw soil conditions in seasonal frozen soil region of the central Tibetan Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **63**(1): 97 – 107.
- [34] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社. 2001: 322 – 324. [XU Xuezu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Frozen soil physic [M]. Beijing: Science Press, 2001: 322 – 324]
- [35] 孙琳婵, 赵林, 李韧, 等. 西大滩地区积雪对地表反照率及浅层地温的影响[J]. 山地学报, 2010, **28**(3): 266 – 273. [SUN Linchan, ZHAO Lin, LI Ren, et al. The Influence of snow cover on the surface albedo and ground temperature [J]. Mountain Research, 2010, **28**(3): 266 – 273]

Seasonal Changes and Major Influencing Factors of Surface Albedo in the Permafrost Regions of the Qinghai-Tibet Plateau Hinterland, China

SUN Linchan^{1,2,3}, ZHAO Lin^{2,3*}, LI Ren^{2,3}, XIAO Yao^{2,3}

(1. College of History & Geography, Longdong University, Qingyang 745000, Gansu, China;

2. State Key Laboratory of Cryosphere Science Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China;

3. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The seasonal variation of surface albedo and its accurate acquisition are of great significance for the study of the land surface energy and water cycle in the Qinghai-Tibet Plateau. Based on the meteorology and radiation data in 2007 at automatic meteorological stations including Xidatan (XDT) and Tanggula (TGL) (operated by Cryosphere Research Station on Qinghai-Tibet Plateau, CAS), the effects of solar altitude angles, snow cover and active layer freezing and thawing process on the changes of surface albedo were studied via correlation analysis in the permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau. The results showed obvious changes in surface albedo during snowfalls in cold and warm seasons and the soil moisture and air temperature were reversely correlated with the surface albedo in the process when there was no snow. Referring to snow cover days and air temperature, the monthly average surface albedo was calculated via multivariate regression analysis. The test results indicated that the average relative error between the calculated and the measured value was 7.1%, which could be used to estimate the surface albedo in the northern part of Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; freezing and thawing process; surface albedo; seasonal changes; regression equation