文章编号：1008 - 2786 - (2009)3 - 265 - 05

高寒金露梅灌丛草甸植被反射率特征

李英年[1]，赵 亮[1]，赵新全[1]，王勤学[2]，杜明远[3]，张法伟[1]
(1. 中国科学院西北高原生物研究所，青海 西宁 810001；2. 日本国立环境研究所，日本 筑波 3050053；
3. 日本农业环境技术研究所，日本 筑波 3058604；4. 中国科学院研究生院，北京 100049)

摘 要：根据祁连山海北高寒金露梅灌丛草甸 2004 年观测的太阳总辐射和反射辐射资料，分析了高寒金露梅灌丛草甸植被反射率(A)的变化特征。结果表明，金露梅灌丛草甸 A 在日间或一年间均表现出“U”型变化规律，晴天、昙天和阴云天气状况下的早晚略有差异，中午前后的 A 值三者无明显差异。季节不同下垫面性质不同的影响，A 的分布不同。海北高寒金露梅灌丛草甸 A 的月平均在植物生长季内 5 ~ 9 月为 0.15，植物非生长季的 10 月 ~ 翌年 4 月为 0.20，年平均 A 为 0.18。

关键词：高寒金露梅灌丛草甸；反射率；植物生长季和非生长季；变化特征
中图分类号：Q948　　**文献标识码**：A

生态系统中太阳辐射能是生命活动的根本能源，它通过对植物的生理生化作用，直接或间接影响地球植物群落结构、分布以及植被生产力的形成，是生态系统结构、功能基本外源驱动力。因此，生态学、微气象研究者对于太阳辐射以及反射辐射和反射率(A)的气候变化特征研究极为重视[1-6]。通常照射到植被冠层表面的太阳辐射一部分被反射回太空，其余部分进入植物生态系统中进行转化和交换，但反射强度因下垫面性质差异而不同，这不仅表现在植被类型、地理和地形分布等方面，同类型植被的不同生长时期也有差异。然而，对于下垫面 A 的研究常见于森林、草地、农田等[1-6]，较少涉及青藏高原高寒金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸。

金露梅系蔷薇科委陵菜属植物，是寒温带多年生落叶灌木的典型植物之一，广布于我国东北、华北、西北、西南的高山地区，在朝鲜、蒙古和俄罗斯的西伯利亚亦有分布[7]。在青藏高原，多分布在东部海拔 2 700 ~ 4 500 m 的山地阴坡、土壤湿度较高的平缓滩地，以及地下水位较高的河谷阶地。具有明显的地带性分布规律。在青藏高原其分布面积仅次于高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸，是良好的天然放牧草场。本文利用祁连山海北高寒金露梅灌丛草甸的辐射长期观测结果，分析其 A 的基本特征。对该生态系统的能量流动及其物质循环过程研究提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)东北方 7 km 处的高寒金露梅灌丛草甸实验区进行。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(101°19′E、37°37′N，海拔高度约为 3 240 m)。据调查[7]，该实验区植被以 2 层植物群落，结构简单，除上层金露梅外，底层草本植物种类组成丰富，生物生产力高。金露梅灌丛株高一般在 30 ~ 40 cm，最高达 60 cm。调查地段有 47 种植物组成，隶属 15 科 37 属，总盖度

收稿日期(Received date)：2008 - 06 - 30；**改回日期**(Accepted)：2009 - 03 - 01。
基金项目(Foundation item)：中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2 - YW - 432 - 1)；国家科技部支撑项目(2006BAC08B02)项目；中国科学院西部行动计划项目(KZCX2 - XB2 - 06 - 01)；中日合作“温暖化影响的早期监测网络系统建设”项目基金项目：中科院知识创新工程重要方向项目(KJCX2 - YW - 432 - 1)；科技部支撑项目(2006BAC08B02)项目；中科院西部行动计划项目(KZCX2 - XB2 - 06 - 01)。[Supported by Knowledge Innovation Project of The Chinese Academy of Sciences(KJCX2 - YW - 432 - 1)；National Key Technology R& D Program (2006BAC08B02)；The CAS Action - Plan for West Development (KZCX2 - XB2 - 06 - 01).]
作者简介(Biography)：李英年(1962 -)，男，副研究员，主要从事生物气象、全球变化研究工作。[Li Yingnian(1962 -), Associate professor, Major research field in Biometeorology.]E - mail：ynli@ nwipb. ac. cn

91%，草高 8 ~ 16 cm。优势种有藏异燕麦（*Helictotrichon tibeticum*）、垂穗披碱草（*Elymus nutans*），次优势种有异针茅（*Stipa aliena*）、羊茅（*Festuca ovina L.*）、紫羊茅（*Festuca rubra*）、线叶嵩草（*Kobresia capillifolia*），伴生种有柔软紫菀（*Aster flaccidus*）、山地早熟禾（*Poa orinosa*）、棘豆（*Oxytropis ochrocephala*）、瑞苓草（*Saussurea nigrescens*）、珠芽蓼（*Polygonum viviparum L.*）、矮火绒草（*Leontopodium nanum*）、尖叶龙胆（*Gentiana aristata*）、糙毛野青茅（*Deyeuxia arundinacea*）、花苜蓿（*Trigonella ruthenica*）、圆萼摩苓草（*Morina chinensis*）等。

由于金露梅系寒温带多年生落叶灌木，故金露梅灌丛草甸在不同季节其外表景观截然不同。春季（4 ~ 5 月）地表处于全年最干燥时期，底层土壤仍在冻结，经冬季放牧，植物现存量极低，部分地面甚至裸露。该时期植物进入萌动发芽初期，但金露梅的发芽稍迟。夏季到秋季阶段，植物生长繁茂，土壤潮湿，基本处于不放牧时期。秋季后期到次年春季前期为全年放牧最重（多）时期，放牧主要以马和牦牛为主，在金露梅灌丛内因降雪时有积雪覆盖。

在长期的生物和气候综合影响下，发育着典型的暗沃寒冻雏形土，因草本植物根系与金露梅灌丛的木本根系交织一起，植物地下生物现存量高，土壤有机质含量丰富。据海北站气象观测资料[8]，区域近 20 年来多年平均气温为 - 1.6℃，降水量约 560.0 mm，年日照时间可达 2 467.7 h，专用 20 cm 口径水面蒸发 1 238.0 mm，平均风速较低，年平均仅为 1.7 m/s，空气相对湿度为 67%，平均气压 691.4 hPa。气候特点是空气稀薄，气温低，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。

1.2 研究资材料

辐射观测仪器由中国通量网（China Flux）在海北站东北金露梅灌丛草甸实验地投入的涡度相关观测系统及常规气象观测仪进行。总辐射表（CM11，Kipp & Zonen，USA）安装高度离植被冠面上方 1.5 m。气象要素观测了气温、湿度、地温、降水等。另还有人工气象站观测的云量、日照时间等。其本文所采用的资料为 2004 年，北京时间，以 0:00 划分日界。自动采集系统数据的采集频率为 10 Hz，输出 30 min 平均值。

2 结果与分析

2.1 A的日变化

图 1 给出了 1 ~ 12 月 *A* 的月平均日变化，其中 5 ~ 9 月代表植物生长季，1 ~ 4 月和 10 ~ 12 月代表了植物非生长季。图 1 看到，不论是植物非生长季还是生长季，*A* 在日出后和日落前较高，而且不同月份差异较大，最高可达 0.4 以上。日间太阳高度角达到一定值后 *A* 值比较稳定，如 1 月平均日变化中，11:00 ~ 17:00 一般稳定在 0.21 ~ 0.23 间，但早晚可在 0.24 以上。7 月 *A* 的月平均日变化中，9:00 ~ 17:00 一般稳定在 0.12，早晚在 0.13 ~ 0.31 间波动。日间这种“U”型分布状况主要与太阳高度角的变化有关。太阳高度角的改变，可使太阳光线的入射角和辐射光谱成分发生变化。首先，到达地表面的太阳光光谱组成由于在地球大气所通过的路线长短发生变化。另外，太阳光线在不同时间其入射角不同。当太阳高度角低时，太阳辐射光谱中长波部分占有较大的比重，而地表对长波（红外）辐射部分的反射能力总是很强，当太阳高度角低时，意味着到

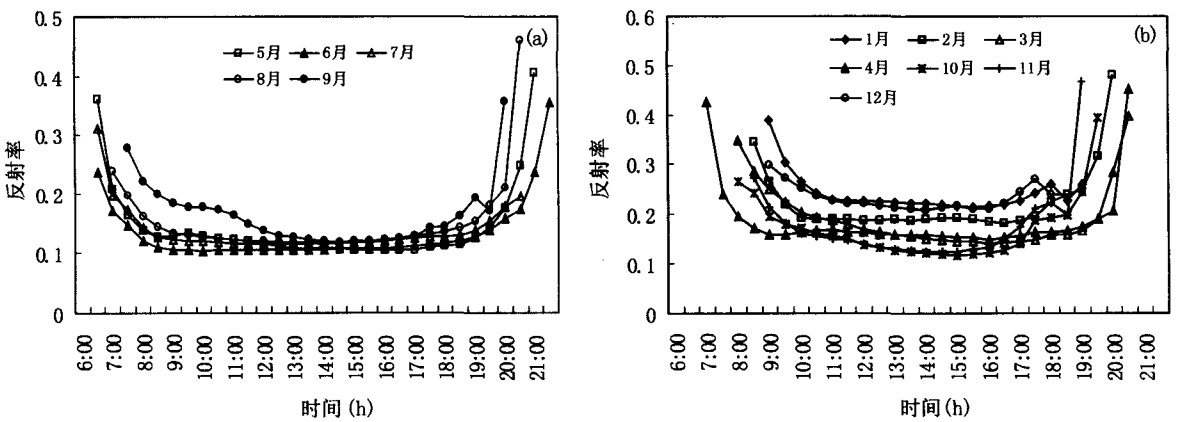

图 1 高寒金露梅灌丛草甸植物生长季（a）和非生长季（b）地表反射率各月平均日变化

Fig. 1 The average diurnal variations of surface reflectivity in growing season (a) and non-growing season (b) of alpine *Potentilla fruticosa* shrub meadow

达地表的入射角大,而任何表面对入射角大的光线其反射能力就强。因而,在太阳高度角低的早晚,地表反射率大。反之,随太阳高度角的增加,太阳辐射中短波部分所占的比重增大,导致 A 减小,这种影响在太阳高度角低时更为显著。

如果采用太阳高度角(h)进行 A 的模拟,一般均可用指数方程的形式($A = ae^{bh}$)来表示[1-4],只是因地区(主要是地理纬度)的不同其指数方程的回归系数而不同,这里多不论述。但分析表明,一般日间太阳高度较高时,A 与太阳高度角的指数关系不甚明显,也就是说在太阳高度角高时(一般 > 30°[1-4]),A 的变化不大且较为平稳,在太阳高度角低时(一般 <30°),A 的变化较为剧烈。

所表现的"U"型分布状况除太阳高度角的影响外,另一原因是冬季下垫面常有霜冻存在,夏季因地区空气湿润,水汽含量高,在日出和日落前后,植被表面易结露,同时由于海拔高,温度低,部分寒冷的早晨还往往发生霜冻现象,导致植物表面形成一定的"水镜面",这也是导致 A 提高的另一原因。

2.2　反射率与天空状况的关系

图2给出了时间相近的典型晴天、昙天和阴天的 A 日变化过程,其中7月9日为晴间少云天(14:30有微量云存在)、7月7日为昙天、7月8日为阴天。可以看到,3类天气过程的 A 均呈现"U"形分布特点,但不同天气所表现的"U"型结构略有差异,主要表现在日出日落的前后。

阴雨天气状况下,由于日出后和日落前阶段植被冠面有大量的露水存在,天空以散射辐射为主,太阳高度角的影响很小,A 明显提高;在多云天气的状况下,由于云层存在,地表凝结水少,A 在日出后和日落前阶段相对较低,晴天状况下结露仅次于有降水时的天气状况,日出后和日落前阶段的 A 也是较高的。日间8:30到19:00期间,7月7日、7月8日和7月9日的 A 分别为0.12、0.11和0.12,表现出阴雨天由于云层厚,太阳辐射主要为散射辐射主导,导致 A 的值比晴天和多云天降低0.01。在日间的8:30到19:00之间,A 表现出阴天 > 昙天 > 晴天,但在日出后的8:30以前和日落前17:00以后 A 表现出阴天 > 晴天 > 昙天。

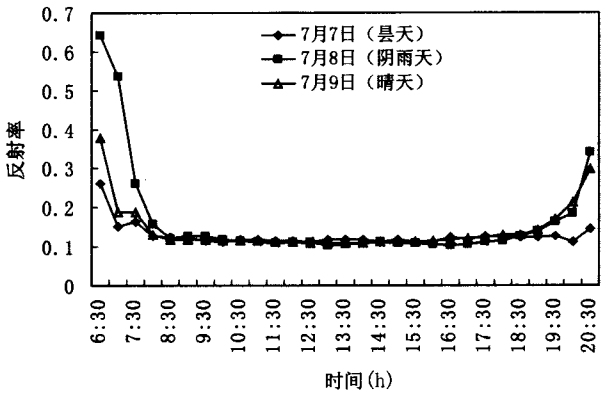

图2　高寒金露梅灌丛草甸晴天、昙天、阴天状况下反射率的日变化比较

Fig. 2　The comparisons of daily variations among sunny, full-cloudy and cloudy days in alpine *Potentilla fruticosa* shrub meadow

2.3　A的季节变化

图3(a)给出了金露梅灌丛 A 的季节(月际)变化。考虑到早晚日出(落)前后的时间段太阳高度角很小,加之易受地面结露、霜冻的影响,太阳总辐射和反射辐射都很低,计算出的反射率容易出现奇异值,这里也绘出了当地正午时13:30的 A 的季节变化过程。同时在图3(b)给出了2004年 A 逐日平均值年变化情况。

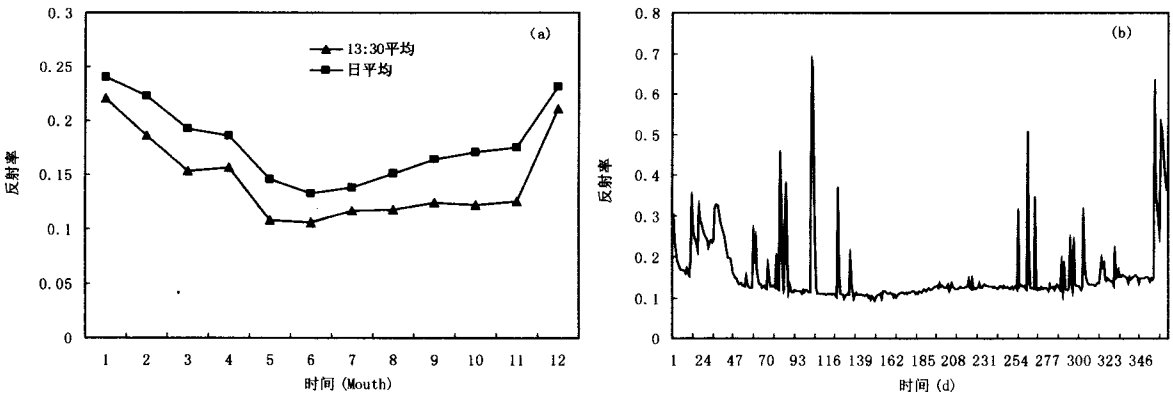

图3　高寒金露梅灌丛草甸反射率的季节变化(a为逐月平均;b为逐日平均)

Fig. 3　The seasonal variations of reflectivity in alpine Potentilla fruticosa shrub meadow (a was monthly average, and b was daily average)

图3a看出,2004年A的日平均自1月的0.24开始下降,6月最低,为0.13,以后又逐渐增加,到12月为0.23,表现为"U"分布型。这种变化除受冬季太阳高度角低的影响外,还受到不同季节下垫面差异的影响。冬季下垫面干燥,加上在降水过程时易在地表产生积雪,增大了反射辐射,A较大;植物生长季的6月金露梅刚展叶,底层草本植物呈深绿色,并形成了一定的叶面积,植株茂密,夏季土壤湿润,将导致反射辐射的降低。数据分析表明,6月A最低。7月以后金露梅开花,底层部分草本植物也出现开花阶段,植层冠面颜色稍浅,提高了A值,以后随植物成熟,植被冠面颜色变得越来越浅,A逐渐增大。正午时13:30的A的季节变化具有相同变化规律,只是因在太阳高度角高的正午,其值将比日平均低0.02~0.05。

以逐日平均值的时间进程来看(图3b),生长季内A比较稳定,5~8月中旬变化于0.13~0.16。但在冬季及其季节交换时期的秋~冬季和冬~春过渡季节,由于高寒金露梅灌丛草甸分布地区温度低,降水以降雪为主,在4月或9月末,虽然日间温度高,但夜间温度下降明显,早晨常降到0℃以下,这种条件下常会出现日间降雨,早晨降雪,地面积雪导致A的提高。如图3(b)所示,冬季12月22~28日,冬~春过渡季的4月14日和15日,秋~冬过渡季节的9月21日A的急剧升高均与当日上午或前日因降雪导致地面有积雪有关。冬季12月22日前近1个月时间未产生降雪,A维持在0.14~0.16之间,从22日开始到26日期间降水1.6 mm,虽然降水量不高,但冬季严寒,地面积雪不易融化,维持时间长,A值大于0.35以上的高值达16 d,维持到2005-01-05,最高的12月22日达0.64;在春-夏过渡季的4月14日和15日,日间温度较高,早晚很低,日间降雨,到夜间转变为降雪,因降水比冬季明显大,地表积雪深厚,导致该2日的A增高明显,分别为0.68和0.66,但无降雪太阳照射下积雪融化很快,A值迅速下降,如17~19日分别下降到0.24、0.12和0.11;与春夏季节交换不同的时,在夏秋季节交换时期,土壤温度很高,同样在日间降雨夜间温度下降转为降雪的情景下,A在降雪后急剧升高,但次日随地面积雪的融化A急剧降低,如9月20日上午开始有降水产生,但以降雨为主,约在17:20开始转为雨加雪,夜间为降雪,至21日9:00降水停止,使21日A的值高达0.51,到22日因土壤温度较高积雪融化后又下降至0.21,到22日为0.12。值得说明的是,季节转化期在有降水到下次降水过程前的时段中,A的日平均变化常出现一种普遍想象:降水产生当日(前期为降雨,后期为降雪)光照弱,日平均A为低,到第2日降水停止,天空放晴,A的日平均随之升高,以后的几天内,随积雪融化,土壤潮湿,A的日平均值甚至低于6~7月植物旺盛生长时期,说明土壤湿度的增大使A值下降明显。

总的来看,生长季内海北高寒金露梅灌丛草甸的A比较稳定,5~9月A的月平均在0.13~0.16,5个月平均为0.15。低于同地区的矮嵩草草甸[9],与同地区的藏嵩草沼泽化草甸基本相同[10]。非生长季的10月至翌年4月A的月平均变化在0.17~0.24之间,7个月平均为0.20,低于同地区的矮嵩草草甸和藏嵩草沼泽化草甸,特别是比藏嵩草沼泽化草甸低很多。其原因在于藏嵩草沼泽化草甸冬季下垫面为积雪和冰面所覆盖,导致A明显高,矮嵩草草甸地势平坦,下垫面均一,而金露梅灌丛草甸由于灌丛斑块生长结构的影响,冠面结构显得相对粗糙,致使A值降低显著。全年来看,海北高寒金露梅灌丛草甸的年A为0.18。

3 结语

1. 受太阳高度角影响,加之高寒金露梅灌丛草甸早晚多受较强露水和霜影响,导致日落日出前后A的日值较高,中午较低。

2. 金露梅灌丛草甸A与天空状况有很密切的关系,虽然各类天气状况下(晴天、昙天和阴云天气)反射率日变化曲线呈"U"形分布,但3类天气状况下在早晨和傍晚A的变化差异明显,日间太阳高度角达一定高度时其变化性质基本一致,中午前后A值三者无明显差异。

3. 5月下旬至9月初是高寒植物生长的最佳时期,故在年内该期间A值最低,但由于高寒各种植物生理生态的差异,其完成整个生长过程的时间较不一致,在金露梅尚未开花但枝叶展开,其下层草本植物生长达一定叶面积,以及土壤比较潮湿时的6月低。以后依次随金露梅以及其他部分植物开花,下垫面颜色变浅,7~9月逐渐升高。但在5月处于与7月相同的A值,这是由于5月地表较潮湿所致,说明土壤湿润状况也是影响A的重要环境条件之一。10月以后植被枯黄,降雪导致地面积雪,到次年的4月A均表现出较高的水平。

4. 海北高寒金露梅灌丛草甸植物生长季内5~9月A的月平均为0.15,植物非生长季的10月~翌年4月A的月平均为0.20,年平均A为0.18。由于

灌丛生长斑块结构,冠面相对粗糙,其 A 与同地区下垫面均一的矮嵩草草甸和冬季冰雪覆盖的藏嵩草沼泽化草甸相比明显不同。

参考文献(References)

[1] Wu Aaisheng, Zhong Qiang. Relationships between global radiation, surface albedo and solar elevation angle for several underlying surfaces in the HEIHE experimental[J]. *Plateau Meteorology*, 1993,12(2): 147~154[吴艾生, 钟强. 黑河实验区若干下垫面总辐射、地表反射率与太阳高度角的关系[J]. 高原气象, 1993, 12(2): 147~154]

[2] Shen Zhibao, Zuo Hongchao. The study the variation of the surface albedo over the Qinghai-xizang plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 1993, 12(3) :294~301[沈志宝, 左洪超. 青藏高原地区反射率变化的研究[J]. 高原气象, 1993, 12(3): 294~301]

[3] Bian Lingen, Lu Longhua, Lu Changgui, *et al.* The characteristics of radiation balance components of the Tibetan plateau in the summer of 1998[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 25(5): 578~588[卞林根, 陆龙骅, 逮昌贵,等. 1998年夏季青藏高原辐射平衡分量特征[J]. 大气科学, 2001, 25(5): 578~588]

[4] Guan Dexin, Jin Mingshu, Xu Hao. Reflectivity of broad-leaved Korean pine forest in growing season on Changbai Mountain[J]. *Chinese Academy of Sciences*, 2002, 13(12): 1544~1546[关德新, 金明淑, 徐浩. 长白山阔叶红松林生长季反射率特征[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1544~1546]

[5] Qian Zeyu, Hu Zeyong, Du Ping, *et al.* Comparison and analysis of the climatiological 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[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]

[6] Ji Guoliang, Hou Xuhong, Lü Lanzhi, *et al.* Characteristics of radiation budget on different underlying surfaces in the arid region[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2004, 25(1): 37~40[季国良, 候旭宏, 吕兰芝,等. 干旱地区不同下垫面的辐射收支[J]. 太阳能学报, 2004, 25(1): 37~40]

[7] Li Yingnian, Zhao Lang, Wang Qinxue, *et al.* Estimate of biomass and its annual turnover quantities in potentilla froticosa shrub[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(1): 72~76[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]

[8] Li Yingmian, 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]

[9] 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]

[10] Li Yingnian, Zhao Lang, Zhou HuaKun, *et al.* Characterizing reflected radiation and reflectivity for growing season of alpine swamp in the Northern Qinghai[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1):137~143[李英年, 赵亮, 周华坤,等. 高寒湿地太阳辐射和地表反射率变化的统计学特征[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1):137~143]

The Dynamic Features of Alpine *Potentilla fruticosa* Shrub Meadow Vegetation Reflectivity

LI Yingnian[1], ZHAO Xinquan[1], WANG Qinxue[2], ZHAO Liang[1], DU Mingyuan[3], ZHANG Fawei[1,4]

(1. *Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining* 810001, *China*;
2. *National Institute for Environmental Studies*, 3050053 *Japan*; 3. *National Institute for Agro-Environmental Science*, 3058604 *Japan*; 4. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Using the data of the solar total radiation and reflectivity measured in Haibei alpine Potentilla fruticosa shrub meadow in 2005, we analyzed the dynamics of the vegetation reflectivity (A). The results showed that the A changes in day or year all had "U" sharp in alpine shrub meadow. There were a few differences in A values of dawn and dusk among the sunny, full-cloudy and cloudy days while no significant differences before noon and after noon. Because of the plant vegetation differences with climate changes, the A was dynamic in year. The annual mean A was 0.18 with 0.15 in plant growing season from May to September and 0.20 in non-growing season from October to following April in alpine Potentilla fruticosa shrub meadow.

Key words: alpine *Potentilla fruticosa* shrub meadow; reflectivity; plant growing and non-growing season; dynamics