

文章编号: 1007-4619(2003)06-0433-07

雪地上的森林冠层混合反照率模型

蒋玲梅¹ 杨 华¹ 王锦地¹ 李小文^{1,2} Kimberly J. Schaudt³

(1. 北京师范大学 遥感与 GIS 研究中心, 资源环境科学系 环境遥感与数字城市北京市重点实验室 北京 100875;
2. Dept. Geography and Center for Remote Sensing, Boston Univ., USA 3. Arizona Univ. Tucson, AZ 85721, USA)

摘 要: 反照率通常定义为出射与入射的能量之比, 是地表能量平衡中的关键因子。气候变化对反照率也很敏感。典型的气候变化预测是通过 GCM 与地表模型结合进行的。目前在地表模型(如 BATS 模型)中, 是通过空气动力学粗糙度 Z_0 与降雪深度 d 两个参数来估计雪地上树冠的反照率的。在他们的工作基础上, 重点考虑对于不同的太阳天顶角, 直入—扇出反照率的方向性及其与叶面积指数(LAI)的关系。同时, 为了保持 BATS 模型所需反照率模型的基本特征, 主要在几何光学—辐射传输混合模型(GORT)的基础上做了一些近似来达到此目的。最后, 以针叶林为例, 用 MODIS 的反照率数据和 BOREAS 地面观测数据做了初步的模型验证。结果显示模型较符合实际情况。

关键词: GORT 模型; 混合像元反照率; 方向间隙率; 开放度
中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引 言

地表反照率直接控制着地表的净辐射平衡, 进而控制整个能量平衡, 因此, 气候变化对反照率也很敏感^[1]。反照率一般取决于入射太阳光的波长及入射角^[2]。BATS(Biosphere Atmosphere Transfer Scheme)模型^[3]中雪的反照率(α_s)取决于太阳入射天顶角, 气溶胶粒子大小等, 这两个参量由 Wiscombe 和 Warren^[4]的反照率模型得到, 而植被的反照率(α_c)不仅是太阳入射天顶角 θ 的函数(虽然对 θ 的依赖性很小)还与植被的叶面积指数(LAI)有直接的关系, 这里假设 LAI 及它的季节变化由植被类型决定。

空气动力学粗糙度 Z_0 是地表模型中描述地表阻止空气流动的一个很重要的参数。BATS 模型中, 降雪深度 d 决定了枝条被雪覆盖的面积。给定 Z_0 与 d , 可得到 Dickinson 用于 BATS 模型的反照率模型中的雪盖面积比。利用雪盖面积比来计算反照率是一种很好的方法, 它把树冠上有雪覆盖时的枝条反照率也考虑进去。但是此方法最大的缺陷是未能考虑由

于不同的太阳天顶角造成直入—扇出反照率的方向性, 以及未考虑直入—扇出反照率与像元 LAI 的关系(Dickinson, 曾绪彬等, 见致谢)。由于雪地上的树冠反照率对全球气候变化研究有很重要的影响, 因而很有必要研究雪地上树冠的反照率模型, 提高反照率估算的精度, 从而提高全球气候变化预测的精度。为了简化问题, 本文假设纯雪与植被的反照率是常数。

GORT 模型^[5]是以几何光学间隙率模型^[6]和辐射传输模型中的多次反弹^[7]为基础, 结合了几何光学模型简单明了和辐射传输模型能反映多次散射的优点, 能很好地处理雪地上树冠反照率的方向性问题。因此, 本文在 Schaudt 和 Dickinson^[8]的工作基础上, 利用 GORT 模型推导了像元尺度上雪地树冠的混合反照率模型, 包括树冠上有雪覆盖的情况。这种模型较为简单, 但描述了反照率与主要影响因素之间的关系, 同时保留了气候变化研究中地表模型所需的反照率模型基本特征, 能为全球气候变化研究提供支持。

2 基本原理与方法实现

树冠的形态一般可以近似成锥体或者椭球体,

收稿日期: 2001-06-26; 修订日期: 2003-01-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900), 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49971059), 美国 NASA 项目(编号: NAS5-31369, NAG5-7217), 高等学校骨干教师资助计划资助。

作者简介: 蒋玲梅(1978—), 女, 2000年毕业于南京气象学院, 获农业气象专业学士学位, 现于北京师范大学遥感与 GIS 研究中心攻读博士学位。目前从事被动微波积雪雪水当量研究, 已在国际会议上发表了7篇文章及在中国科学上发表了1篇文章。Email: jllinmei@263.net

用其高度与宽度比(CAR)来定量描述^[6],则树冠的阴影面积 γ 在给定太阳入射天顶角 θ 的情况下,都可以定量求出^[6,9]。本文以锥形体近似树冠为例讨论,还作了其他一些近似假设,如假设雪面与树冠表面均为朗伯反射(各向同性);气象上定义的反照率是指从水平表面向上半球空间的反射,本文中像元的反照率也如此定义。

当只考虑太阳直射光时,太阳光入射方向的方向间隙率计算表达式为:

$$P_{\text{gap}}(\theta) = P(n=0) + P(n=1) * p_1(L_p, \theta) + P(n>1) * p_2(LAI, \theta) \quad (1)$$

其中 n 是光线到达地面时穿过树冠的个数, $P(n=*)$ 是树冠大小、形状、密度的函数^[5],是服从泊松分布的概率密度函数,均值为 $n * \gamma$ 。 $P(n>1) = 1 - P(n=0) - P(n=1)$; p_1 是穿过单棵树冠的平均间隙率; p_2 是整个冠层的平均间隙率。计算公式如下:

$$p_1(L_p, \theta) = e^{-\frac{0.5 * L_p * B}{\gamma}} \quad (2)$$

其中 L_p 是单棵树的叶面积指数, B 是单棵树冠的基面积。

$$p_2(LAI, \theta) = e^{-\frac{0.5 * LAI}{\cos(\theta)}} \quad (3)$$

此处的 LAI 是整个森林的平均叶面积指数。

L_p 与 LAI 的关系为: $LAI = L_p * f_c$, f_c 为森林植被的垂直覆盖度^[6]。

定义开放度 K_{open} 为地面上任意一点看到天空(对上半球空间)的平均概率。计算公式如下:

$$K_{\text{open}} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} P_{\text{gap}}(\theta) \sin(2\theta) d\theta \quad (4)$$

由于假设地表的雪是朗伯体,则直射光到达雪地且直接逃离冠层的部分为: $\alpha_s * P_{\text{gap}}(\theta) * K_{\text{open}}$ 。对于混合像元中的树冠部分,树冠表面面积元半球反射中,一部分(水平面上)可直接逸出冠层,记为 α_{up} ,向下的部分反射到地表(或其他树冠),记为 α_{down} 。对于不同的树冠, α_{up} 与 α_{down} 的差别很大。对于锥型树冠, α_{up} 与 α_{down} 之间的比例取决于锥型树冠的半顶角,他们之间的比值是个定值。而且 $\alpha_{\text{up}} + \alpha_{\text{down}} = \alpha_c$ 。若忽略冠层向下的反射与雪面之间的多次反弹贡献,只考虑冠层表面向上的方向反照率 α_{up} ,则混合像元的反照率(记作最小反照率)为:

$$\alpha_{\text{min}} = P_{\text{gap}}(\theta) * \alpha_s * K_{\text{open}} + \alpha_{\text{up}} * (1 - P_{\text{gap}}(\theta)) \quad (5)$$

要得到此时精确的多次反弹计算公式是完全可能的^[7]。但是公式太复杂,而且对于实际应用的精

度要求来讲也是没有必要的。因此本文考虑简化此时冠层向下的反射与雪面之间的多次反弹计算。

考虑树冠表面面积元向下的反照率 α_{down} ,则所有到达雪地的入射为: $P_{\text{gap}}(\theta) + \alpha_{\text{down}} * (1 - P_{\text{gap}}(\theta))$,因而混合像元中所有来自雪地的向上半球空间的反射为:

$$\alpha_s * (P_{\text{gap}}(\theta) + \alpha_{\text{down}} * (1 - P_{\text{gap}}(\theta))) \quad (6)$$

此时,像元总的反照率(记作最大反照率)包括:直接从雪表面逸出的部分,到达树冠表面后经过多次反弹作用后逃逸的部分,以及直接逃离冠层的部分:

$$\alpha_{\text{max}} = \alpha_s * (P_{\text{gap}}(\theta) + \alpha_{\text{down}} * (1 - P_{\text{gap}}(\theta))) * K_{\text{open}} + \alpha_{\text{up}} * (1 - P_{\text{gap}}(\theta)) \quad (7)$$

从公式(5)与公式(7)可看出他们之间存在一个由于多次反弹造成的误差值。这个误差值在理论上可以达到很大。比如,当 $\alpha_c = \alpha_s = 1.0$, $P_{\text{gap}}(\theta) = 1.0$, $K_{\text{open}} = 0$ 时, $\alpha_{\text{min}} = 0$,而误差值为1.0。这种情况类似于理想的朗伯体表面组成的黑体腔。当然真实雪地上的树冠不会出现这种情况,若出现 $P_{\text{gap}}(\theta)$ 非常大的那种情况(即大部分直射光直接照到雪地),则树冠与雪面多次反弹的量很小,可忽略不计,所以公式(5)可认为是公式(7)的一种简单近似。

对于树冠上有雪的情况,假设雪是平铺在树枝上的,此时只考虑树冠上向上的反照率 α_{up} ,忽略向下的反照率 α_{down} ,即 $\alpha_c = \alpha_{\text{up}}$,同时,由于冠层上雪的覆盖,方向性间隙率 $P_{\text{gap}}(\theta)$ 随着树冠上雪的覆盖度增加而减小。同样, K_{open} 也随之减小。因此,我们可得到树冠上有雪覆盖时的方向间隙率公式:

$$P_{\text{gap}}(\theta) = P(n=0) + (1 - f_s) * P(n=1) * p_1(L_p, \theta) + (1 - f_s) * P(n>1) * p_2(LAI, \theta) \quad (8)$$

其中 f_s 为树冠上雪的覆盖度。

按照上述思想,我们可得到树冠上有雪覆盖的雪森林冠层混合像元的反照率模型:

$$\alpha = \alpha_s * P_{\text{gap}}(\theta) * K_{\text{open}} + \alpha_s * f_s * (1 - P_{\text{gap}}(\theta)) + \alpha_c * (1 - f_s) * (1 - P_{\text{gap}}(\theta)) \quad (9)$$

上式中,混合像元反照率由3部分组成:雪地的反照率、树冠上雪的反照率与树冠的反照率。该模型充分体现了几何光学模型的简洁性的特点,同时又体现了几何光学模型描述反射的二向性的优势。

3 数值模拟结果

用以下参数进行数值模拟:对于可见光波段,取

$\alpha_c = 0.1$, $\alpha_s = 0.8$, 树冠的高度与宽度之比是 3.5, 平均单棵树叶面积指数 $L_p = 1.0$, 冠层的垂直覆盖度 $f_c = 0.71^{[8]}$ 。根据实际情况及研究需要, 给定树冠上雪的覆盖度为 0.1—1.0。

(1) 不考虑树冠上有雪覆盖的情况, 数值模拟

结果如下:

用公式(5)(7)模拟不同的单棵树叶面积指数时, 不同太阳天顶角时, 混合像元最小、最大反照率及其误差值(最大反照率与最小反照率的差值)。他们随叶面积指数或太阳天顶角的变化结果如图 1、图 2、图 3、图 4、图 5 和图 6 所示。

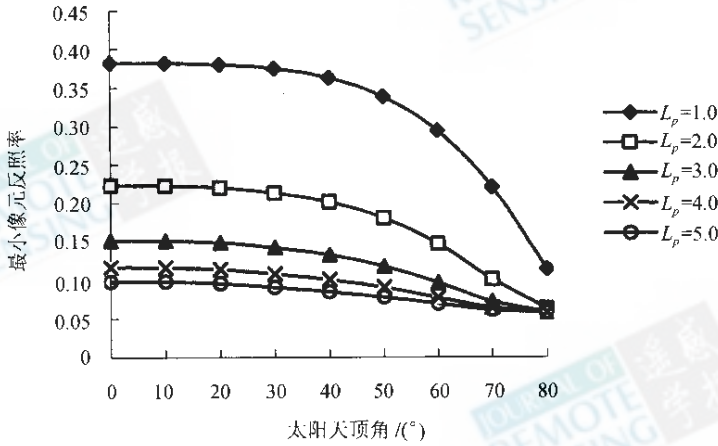


图 1 不同的单棵树叶面积指数时混合像元最小反照率随太阳天顶角的变化
Fig.1 The minimum grid albedo versus solar zenith angle in different average plant LAI (L_p)

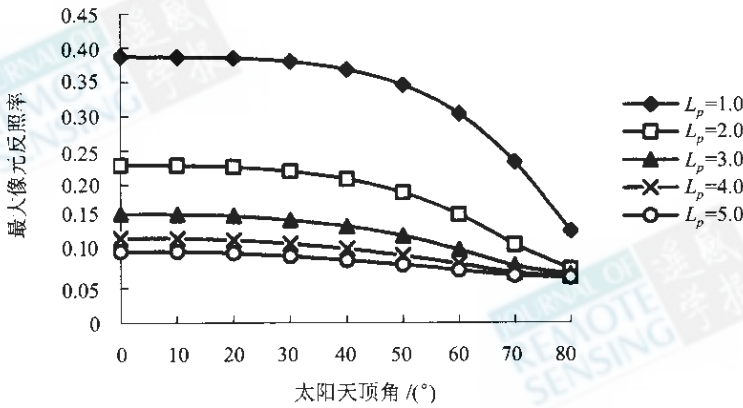


图 2 不同的单棵树叶面积指数时混合像元最大反照率随太阳天顶角的变化
Fig.2 The maximum grid albedo versus solar zenith angle in different average plant LAI (L_p)

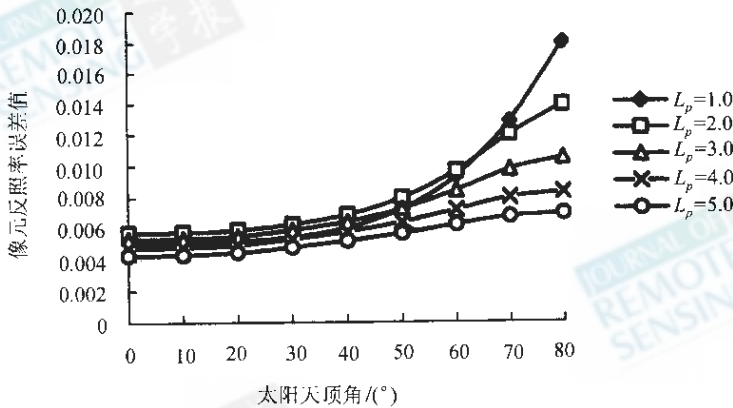


图 3 不同的单棵树叶面积指数时混合像元反照率的误差值随太阳天顶角的变化
Fig.3 The error of grid albedo versus solar zenith angle in different average plant LAI (L_p)

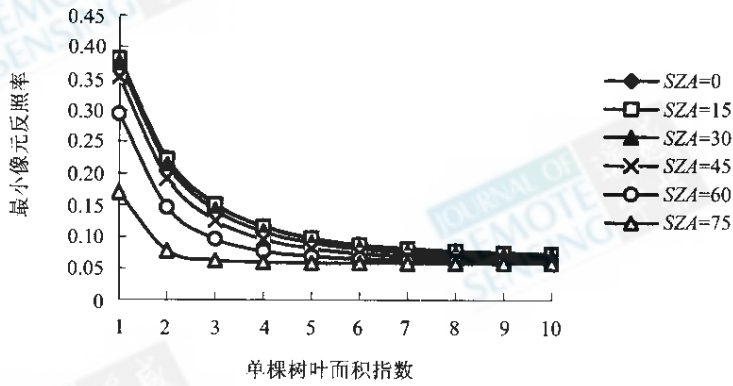


图 4 给定不同入射角时混合像元最小反照率随单棵树叶面积指数的变化

Fig.4 The min grid albedo verses average plant $LA(L_p)$ in different solar zenith angle

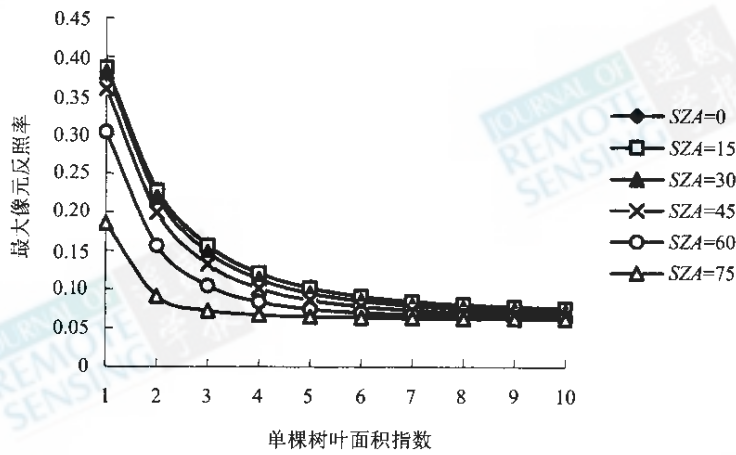


图 5 给定不同入射角时混合像元最大反照率随单棵树叶面积指数的变化

Fig.5 The max grid albedo verses average plant $LA(L_p)$ in different solar zenith angle

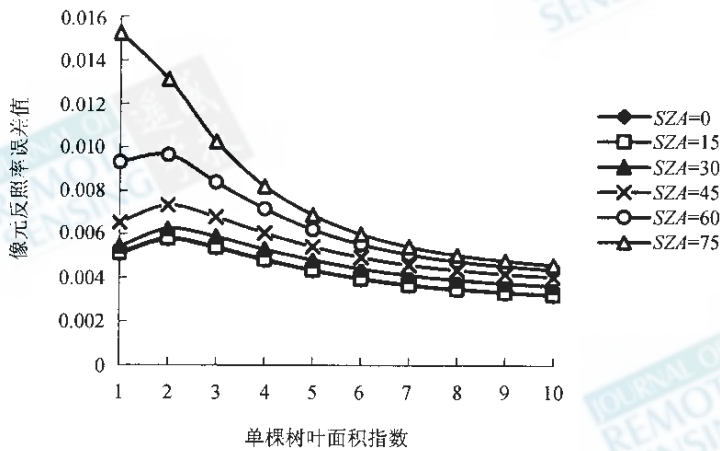


图 6 给定不同入射角时混合像元反照率的误差值随单棵树叶面积指数的变化

Fig.6 The error of grid albedo verses average plant $LA(L_p)$ in different solar zenith angle

从图中可以看出,对于不同的太阳天顶角,混合像元的方向-半球反照率值的大小不同,方向性明显。混合像元的最小、最大反照率的变化趋势一致,均随太阳天顶角从 0° — 70° 增大而减小。然而误差随着太阳天顶角的增大一直增大,说明太阳天顶角很大时,不能忽略多次反弹的贡献。

图 4、图 5 和图 6 是混合像元最小、最大反照率及误差随单棵树叶面积指数的变化结果。从图中可以看出,对于某一太阳天顶角,混合像元的最小、最大反照率均随单棵树的叶面积指数 L_p 从 1.0 增大到 10.0 而减小,并且当 L_p 增大到 5.0 以后,反照率的变化很小,接近于一个常数。当太阳天顶角小于 60° 时,误差值随 L_p 的增大而增大,而当太阳天顶角超过 60° 后,

即在大天顶角时,误差随 L_p 增大先增后减。

(2) 考虑树冠上有雪覆盖的情况,数值模拟结果如下:

图 7 和图 8 分别为 $L_p = 1$ 和 $L_p = 2$ 时不同雪覆盖比时混合像元反照率随太阳天顶角的变化结果。从图中可以看出,当太阳天顶角从 0° 变化到 70° ,雪的覆盖度很小时,混合像元的反照率一直减小(这种情况类似于树冠上无雪的情况),然而当雪的覆盖度增大时,混合像元的反照率随太阳天顶角增大而增大。当 $L_p = 1$ 时 f_s 的临界值为 0.4,而 $L_p = 2$ 时,临界值接近于 0.3。数值模拟结果表明,当雪的覆盖度很大时,由于树冠上雪的贡献,混合像元的反照率变得很大,这个结果与 BATS 原用模型结果^[3]一致。

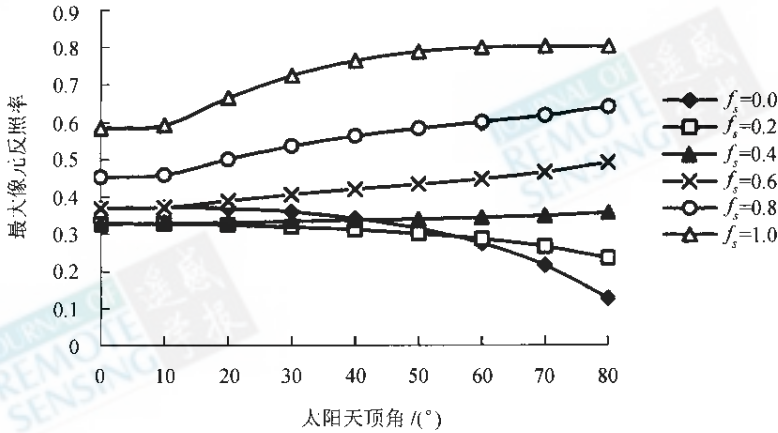


图 7 不同雪覆盖比时混合像元反照率随太阳天顶角的变化

Fig. 7 The grid albedo versus the fraction of snow covered vegetation (f_s) for $L_p = 1.0$

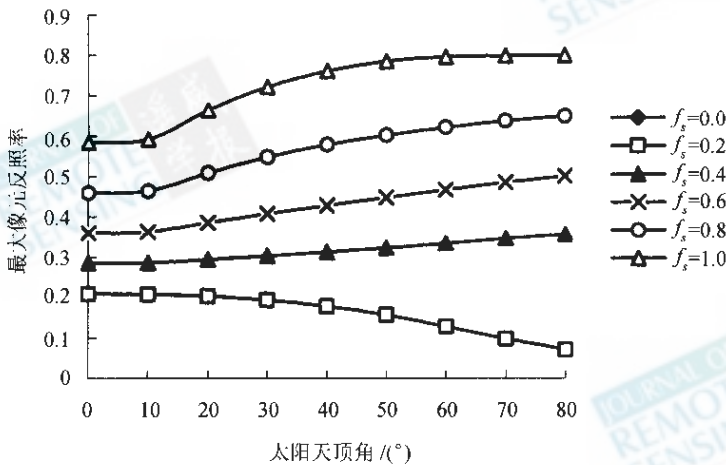


图 8 不同雪覆盖比时混合像元反照率随太阳天顶角的变化

Fig. 8 The grid albedo versus the fraction of snow covered vegetation (f_s) for $L_p = 2.0$

4 模型验证结果

为了分析模型实际应用的适用性以及由模型模拟而造成的误差,用地面实际观测数据和卫星数据对模型进行验证。地面验证数据取自 BOREAS(BoReal Ecosystem Atmosphere Study)的 NSA-OJP(NSA,northern study area;OJP,old jack pine)。由于模型考虑的是雪地森林冠层混合像元的反照率,根据该地区的环境选择冬天时间为10月31日—2月1日。对应此时的森

林冠层结构参数为: $LAI = 1.62$, $L_p = 2.28$,冠层的垂直覆盖度 $f_c = 0.71$,树冠的高宽比是 $3.5^{[6]}$ 。卫星验证数据取该时段内,该地区的 MODIS 数据。 $\alpha_s = 0.667$ 取于 MODIS 纯雪像元反照率数据^[10]。NSA-OJP 点的针叶林冠层无雪覆盖的混合像元反照率 $\alpha_c = 0.091$,有雪覆盖时的混合像元反照率为 $0.167 \pm 0.05^{[11]}$ 。这里提到的反照率均为宽波段的反照率。在上述条件下,模型模拟反照率值与实际反照率值的比较如表 1。

表 1 模型模拟值与实测数据比较结果

Table 1 The comparison of the simulation and the measured data from BOREAS and MODIS

| | | 模型模拟结果 | | | BOREAS-NSA | MODIS-NSA | | |
|------|------|--------|-------|---------|---------------|-----------|-------|---------|
| LAI | SZN | D-H | H-H | albedo* | albedo | D-H | H-H | albedo* |
| 1.62 | 70.7 | 0.112 | 0.164 | 0.138 | 0.167 ± 0.051 | 0.224 | 0.208 | 0.216 |
| 1.62 | 76.3 | 0.105 | | 0.135 | | 0.161 | 0.142 | 0.152 |

表 1 中的 D-H,H-H 分别表示方向-半球反照率和半球-半球反照率,是两种理想状态下的情况(前者为只考虑太阳直射光,后者为只考虑天空光),而实际情况则是既有直射光也有天空光,尤其地表在有雪覆盖的条件下,天空光所占比例很大,可以占到总入射能量的 50%^[12]。本文模型模拟的反照率为两种理想状态下的反照率,MODIS 产品中也有两种理想状态下的反照率值。真实条件下的地表真实反照率必在这两者之间。表 1 中计算的地表真实反照率 albedo* 值为天空光占总入射太阳光的 50%时的情况。

从表中可以看出,模型模拟结果与 BOREAS 的地面实际观测数据比较符合,比平均值 0.167 偏低一些,但基本在其观测误差范围之内。由于在 BOREAS 的地面观测中,测入射太阳能的辐射计上有雪覆盖,使得测量的地表反照率值偏大^[11]。

而从表中可以看出,模型模拟结果与 MODIS 数据不太一致,这是由于本文采用 GORT 模型模拟像元反照率,模拟的二向反射(BRDF,Bi-directional Reflectance Distribution Function)随太阳天顶角的变化是圆屋顶状,而 MODIS 产品是采用半经验的线性核驱动模型,它模拟的 BRDF 随太阳天顶角的变化是浅碗边形,因而它的半球-半球反照率比方向-半球反照率要小,而模型模拟值的结果相反。并且由于 MODIS 产品没有经过大气气溶胶纠正,再加上卫星观测时尺度不一样,看到的地表间隙率要大,因而 MODIS 估计的反照率值要比模型模拟值偏大^[10]。

上述验证结果表明:本文利用 GORT 模型来模拟混合像元反照率随太阳天顶角的变化与实际情况基本符合,可以应用于雪地上的森林冠层反照率的模拟,在一定的假设条件下,其误差大小满足反照率应用精度的要求。

5 结果与讨论

本文用简单的几何光学模型与辐射传输模型混合模型的思路来推导树冠与雪地混合像元的反照率模型。由于 GORT 模型具有纯几何光学模型与纯辐射传输模型各自的优点,因而能很好地解决像元反照率的方向性及多次反弹问题。并且,本文的反照率模型是在 Dickinson 的工作基础上加入了方向与 LAI 两个因子,因此还满足了 GCM 应用方面提出的要求,模型既具有简单性,又具有实用性。用实测 BOREAS 和 MODIS 数据初步验证了该模型的有效性。总的来说,本文中的反照率模型将对于研究全球气候变化有着重大的意义。

但是,由于模型推导过程中忽略了一些次要的影响因素,如雪、冠层本身的反照率并不是常数,而是随 LAI、季节等变化而变化的,忽略了积雪融化及风的影响等,因而本文模型还有很多需要改进之处,有待进一步研究。此外,用于模型验证的配套的地面实测数据和卫星数据不多,模型验证工作还有待进一步收集更多的配套数据后进行。

致谢 本文得益于 2001 年 3 月 1 日波士顿“遥感与 GCM”研讨会上的讨论。参加研讨会的有: Dickinson, 曾绪彬, 杨忠良, 波士顿大学的 A. H. Strahler, C. Woodcock, R. Myneni 等以及作者(李小文)。此外, 多伦多大学陈镜明对于本文提供了有益的质询和建议。

参考文献(References)

- [1] Wei Xue, Dickinson RE, Hahmann AN, et al. Comparison of the Albedo Computed by Land Surface Models and Their Evaluation Against Remotely Sensed Data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D18) : 20 687—20 702.
- [2] Dickinson R E, et al. Land Surface Processes and Climate Albedos and Energy Balance [J]. *Adv. Geophys.*, 1983, **25** : 305—353.
- [3] Dickinson R E, Henderson-sellers A, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme(BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model [R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-387 + STR, 1993, 72.
- [4] Pinker R T, Thompson O E, Eck T F. The Albedo of a Tropical Evergreen Forest [J]. *Q. J. Roy Meteor. Soc.*, 1980, **106** : 551—558.
- [5] Li X, Strahler A H, Woodcock. C. A Hybrid Geometric Optical-Radiative Transfer Approach for Modeling Albedo and Directional Reflectance of Discontinuous Canopies [J]. *IEEE Trans. on GARS.* 1995, **33** (2) : 466—480.
- [6] Li X, Strahler A H. Geometric-Optical Modeling of a Coniferous Forest Canopy [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **23** (5) : 207—221.
- [7] Li X, Ni W, Hu B, et al. Decoupling Path-Scattering of Light in a Homogeneous Layers and Multiple Bouncing at its Non-Lambertian Bottom [J]. *Science in China(Series E)*. 1996, **39** : 656—669.
- [8] Schaudt K. J, Dickinson R E. An Approach to Deriving Roughness Length and Zero-Plane Displacement Height from Satellite Data, Prototyped with BOREAS Data [J]. *Agri. and For. Meteor.* 2000. **104** : 143—155.
- [9] Li X, Strahler. A H Geometric-Optical Bidirectional Reflectance Modeling of Mutual Shadowing Effects of Crowns in a Forest Canopy [J]. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30** (2) : 276—292.
- [10] Jin Y C, Schaaf B C. Gao F, et al. How Does Snow Impact the Albedo of Vegetated Land Surfaces as Analysed with MODIS Data? [J]. *Geophysical Research Letters*. 2002, **29** (10) : 10.1029/2001GL014132.
- [11] Alan K Betts, John H. Ball. Albedo Over the Boreal Forest [J]. *Journal of Geophysical Research*. 1997, **102** (D24) : 28 901—28 909.
- [12] Juhan Ross. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands [M]. Juhan Ross, The Hague-Boston-London, 1981.

Modeling the Albedo of Mixed Forest Canopy and Snow

JIANG Ling-mei¹, YANG Hua¹, WANG Jin-di¹, LI Xiao-wen^{1,2}, Kimberly J. Schaudt³

(1. Research Center for Remote Sensing and GIS, Dept. Geography, Beijing Normal University, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China; 2. Department of Geography and Center for Remote Sensing, Boston University, Boston MA02215 USA; 3. University of Arizona, Institute of Atmospheric Physics, Tucson, AZ85721, USA)

Abstract: A key component of the surface energy balance over land is the albedo, defined as the ratio of the integrated total of reflected solar radiation to the integral of the incoming solar radiation. Climate is sensitive to albedo variation and its changes by natural variations and human activities. Predictions of climate change typically use a GCM linked to a land surface model. Land surface models, e. g. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme(BATS), estimate albedo of trees over snow roughly with the parameters of roughness length, Z_0 , and snow depth, d . Based on their work, we further consider the difference in directional-to-hemisphere albedo for different solar zenith angle(SZA), and leaf area index (LAI) dependence. In order to keep the basic feature of BATS model and add these two new features, we simplified geometric optical and radiative transfer(GORT) hybrid model to reach this purpose. In this paper, we take the conifer as an example. And we validate the model initially with observational data from MODIS and from BOREAS. Results show that: this model can simulate the observations well. This model can be rather simple to retrieve the albedo of remote sensing pixel. It can be a strong tool for understanding the climate system.

Key words: GORT model; grid albedo; directional gap probability; openness