

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2009.06.006

光学遥感

不同大气条件对遥感成像影响的 蒙特卡罗分析方法

杜尚宇, 王先华, 王震

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 随着传感器空间分辨率不断提高, 大气作为遥感成像过程中不可逾越的介质, 由其产生的影响, 可能在一定程度上抵消了分辨率的提高。为了定量的分析不同大气条件对遥感成像带来的影响, 首先介绍了蒙特卡罗原理与蒙特卡罗大气辐射传输模拟方法, 借助 Modtran 的标准大气模式, 模拟了不同条件下光子的扩散情况, 分析了不同波长、能见度、传感器高度、气溶胶粒子非对称因子以及观测角度条件下, 大气点扩散函数的变化情况。模拟结果表明不同大气条件对遥感图像数据质量存在着不同程度的影响。

关键词: 辐射传输; 点扩散函数; 蒙特卡罗方法; 遥感图像

中图分类号: O04

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2009)06-0441-07

Analysis of the Influence on Remote Sensing Imaging under Different Atmospheric Conditions by Monte-Carlo Method

DU Shang-yu, WANG Xian-hua, WANG Zhen

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: With the development of remote sensing space resolution, the atmosphere as impassable medium of remote sensing imaging made the resolution decrease. For quantitative analysis on the influence of different atmospheric conditions, the Monte-Carlo theory and atmospheric radiative transfer by Monte-Carlo method was introduced firstly, and the photons diffusion in different conditions was simulated. Atmospheric point spread function is studied under different conditions of wavelength, different visibility, different remote sensor height, different asymmetry indices of aerosol particle and different observation angles based on standard atmospheric models of Modtran. Experimental results indicate that different atmospheric conditions have some influence on data quality of remote sensing image.

Key words: radiative transfer; point spread function; Monte-Carlo method; remote sensing image

收稿日期: 2009-05-04; 修改日期: 2009-06-04

基金项目: 国防预研基金 (9140A03040408ZK0901) 资助

E-mail: dusy687@163.com

1 引言

遥感技术的发展带来了传感器空间分辨率、特别是军事传感器分辨率的不断提高,然而,大气作为遥感成像过程中不可逾越的介质,由其产生的影响,可能在一定程度上抵消了分辨率的提高。高空间分辨率传感器存在的多种观测方式如垂直、斜向观测等,也会造成大气影响特性上的不同,因此,定量分析遥感成像过程中大气的影 响,对于遥感技术的发展具有重要的指导意义。在大气影响分析中,大气点扩散函数通常是大气影响定量分析的依据^[1]。在获取大气点扩散函数的方法上,目前存在着辐射传输方程法、几何光学模型法和蒙特-卡罗(Monte-Carlo)模拟法等三种方法。相比于解辐射传输方程和几何光学模型,蒙特-卡罗法适用于任何复杂的辐射传输过程,可以非常好地获取不同大气条件下的点扩散函数。

自1949年由Metropolis等提出蒙特卡罗方法以来,特别是近年随着计算机运算能力的快速进步,人们不断尝试用蒙特卡罗方法模拟大气辐射传输过程,如Reinersman等^[2]利用蒙特卡罗模拟的低空大气点扩散函数,并在此基础上对图像进行有效校正,Karl^[3]应用蒙特卡罗方法对海洋与大气耦合进行了辐射传输过程的成功模拟,以及Chervet, Lavigne, Roblin和Bruscaglioni^[4]利用蒙特卡罗方法模拟了不同大气气溶胶条件下的点扩散函数,并在其中讨论了蒙特卡罗模拟中米散射和HG散射相函数之间的一些差异。在国内,徐希孺^[5]基于假设的大气廓线对大气点扩散函数的模拟,以及薛妍^[6]、张涵璐^[7]、任小红^[8]等人对蒙特卡罗模拟光子辐射传输过程等,都在将蒙特卡罗方法应用于大气光子传输上进行了有效的探索。然而从遥感角度来说,传感器存在着与航空、航天遥感不同的飞行高度以及遥感面临着不同的大气条件,因此本文将从不同的遥感条件角度,利用蒙特卡罗方法对大气条件进行模拟分析。

2 大气辐射传输模拟

2.1 大气辐射传输模拟原理

蒙特卡罗法是一种随机模拟方法,以概率和统计理论方法为基础,通过将所求问题与一定概率模型相联系,实现统计模拟或抽样,所以又称统计模拟法或随机抽样技术。在模拟过程中,首先建立一个概率模型或随机过程,设立它们的参数如概率分布或数学期望等,然后通过对过程的观察抽样实验来确定所求参数的统计特征,并用算术平均值作为所求解的近似值。

在大气辐射传输问题时,假设光子与随机分布粒子相互作用为弹性散射,光子与随机介质的作用存在着散射、吸收和逃逸的可能,每个光子遭受多重散射时,只与前一次散射有关,即可把光子历史的状态序列用马尔可夫过程描述。与光子碰撞的粒子包括分子和气溶胶粒子。

2.2 蒙特卡罗方法模拟过程

蒙特卡罗方法模拟大气点扩散函数通常分为以下几个过程:源抽样、粒子运动自由程抽样、粒子散射性质抽样、粒子散射方向抽样、光子扩散位移量。

2.2.1 源抽样

源分布抽样的目的是产生粒子的初始状态,包括粒子的入射角、位置等状态。根据源的性质、位置和介质界面形状的不同,大致可分为半平面各向同性源、球外平行束源、球外各向同性点源、柱内均匀分布源、次级源。

鉴于辐射传输计算中通常假设大气为平行平面,本文的源抽样讨论即以平行平面和球外平行束源入射光为条件。同时设入射光与平面法线夹角为 θ_0 ,以及光子的初始发射位置, $x=0, y=0, z=H$ 。

2.2.2 粒子运动自由程抽样

粒子运动自由程抽样是光子在两次碰撞之间所移动的距离 L ,或称光子自由路径。若定义倾斜光学厚度 d 为沿自由路程 L 对总消光系数的积分 $d = \int_0^L (K_s + K_a) dl$,则光子经过倾斜光学厚度 d 而不发生碰撞的概率密度为 $P(d) = e^{-d}$,那么光子与粒子相距光学厚度为 d 时,非碰撞概率 r_0 则为 $r_0 = \int_0^d p(d') dd' = 1 - e^{-d}$,这里用 ξ_0 代替 r_0 ,它是 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的一个随机数,就可获

得光子在两次碰撞之间的光学厚度 d 的关系式:

$d = |\ln(1 - \xi_0)|^{[9]}$ 。光子在大气传播过程中与粒子碰撞的结果存在被吸收和被散射两种可能, 用单次散射反照率 ω 表示光子被散射的概率, $(1 - \omega)$ 即为光子被吸收的概率。 $\omega = b_s / (b_s + b_a)$, 其中 b_s 为散射消光系数, b_a 为吸收消光系数。

2.2.3 粒子散射性质抽样

如果光子与粒子碰撞没有被吸收, 则发生散射, 依据粒子的性质分为分子散射和气溶胶散射。为确定散射的性质, 抽样过程中应确定光子与分子碰撞的概率和光子与气溶胶碰撞的概率。由粒子运动自由程抽样可以计算出经过随机抽样路径 L 后分子的垂直光学厚度 τ_m 和气溶胶的垂直光学厚度 τ_a , 则光子与分子的相碰撞的概率可用 η 来表示

$$\eta = \tau_m / (\tau_m + \tau_a).$$

光子在大气中的一次随机碰撞性质, 我们可以产生一个在 $[0 \sim 1]$ 区间内均匀分布的随机数 ξ_1 来进行抽样描述。

当 $0 \leq \xi_1 \leq \tau_m / (\tau_m + \tau_a)$ 时, 则认为光子与分子碰撞。

当 $\tau_m / (\tau_m + \tau_a) < \xi_1 \leq 1$ 时, 则认为光子与气溶胶碰撞。

2.2.4 散射方向抽样

散射相位函数 $P(\Omega' \rightarrow \Omega)$ 可用于描述光子与介质碰撞后的出射方向, 由碰撞的性质所决定。

1) 对于气溶胶散射, 其散射方向可由严格的米级数解求得。但在实际当中, 人们常常不这样做。一是因为计算米理论中的相函数较费时, 二是该相函数是以级数的形式给出, 不易于从中抽样出散射方向。

Hengey-Greenstein 散射相函数给出了一个很好的近似模拟, 由于 HG 函数只有一个参数, 所以它更适合蒙特卡罗模拟近似。在目前关于蒙特卡罗的文献中, 大部分采用的是 Hengey-Greenstein 相函数^[3]

$$\beta(\theta) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}.$$

对 HG 散射相函数的积分, 化简可得到累计

概率积分函数为

$$P(x) = \frac{1 - g^2}{2g} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + g^2 - 2gx}} - \frac{1}{1 + g} \right),$$

求其反函数得

$$X = \frac{1 + g^2}{2g} - \left[\frac{(1 - g^2)^2}{2g(2g\xi_2 + 1 - g)^2} \right].$$

$P(x)$ 用随机数 ξ_2 代替, g 为非对称因子, x 为 $\cos \theta$, 随机抽样产生 ξ_2 , 可得到 HG 散射后的散射夹角 θ 。

2) 对于光子与分子的散射可由 Rayleigh 散射相函数确定

$$\beta(\theta) = \frac{3}{3 + p} (1 + p \cos^2 \theta),$$

对散射相函数计算累积, 概率积分函数得

$$p(x) = \frac{3}{2(3 + p)} \left(x + \frac{px^3}{3} + 1 + \frac{p}{3} \right),$$

经化简整理得

$$px^3 + 3x + (3 + p)(1 - 2\xi_3) = 0.$$

其中, p 为分子的极化率, ξ_3 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, x 为 $\cos \theta$, 则散射后夹角 θ 可求。

3) 光子与大气粒子的散射具有轴对称性质, 也就是在垂直于光子传输方向的平面内各向同性, 其散射方位角在 $0 \sim 2\pi$ 内均匀分布, 可抽样为

$$\phi = 2\pi\xi_4 \quad (\text{其中 } \xi_4 \text{ 为 } [0, 1] \text{ 之间的随机数}).$$

4) 在抽样出光子的散射方向后, 应将其转换到全局坐标系中, 求出该次散射的方向 θ , 假设粒子由第 $m - 1$ 次散射到第 m 次散射^[10]

$$\cos \Theta_m = \cos \Theta_{m-1} \cos \theta + \sin \Theta_{m-1} \sin \theta \cos \phi.$$

2.2.5 光子扩散位移量计算

设光子初始的运动方向向下, 先随机产生一个两次碰撞间总的垂直光学厚度, 垂直距离 h 与总垂直光学厚度有相应的对应关系。再分别计算这段距离的气溶胶和分子的光学厚度, 得出光子与气溶胶和分子碰撞概率, 产生个随机数确定碰撞性质,

由此再通过生成两个随机数来确定散射后的去向 (θ, ϕ) 。则自由路程 $l = h / \cos \theta$ 。相应的水平坐标的位移量为 $\Delta x = l \sin \theta \cos \phi, \Delta y = l \sin \theta \sin \phi$ 。如此不断循环，直到光子到达地面为止，得出统计出来的点扩散函数。

3 大气参数的选取与辐射传输的模拟图

本次蒙特卡罗实验参数选自 Modtran 中标准

大气模型^[11]，通过设定太阳入射角、传感器观测角、目标物和传感器的高度、气溶胶光学厚度、单次散射反照率、非对称因子等条件进行模拟。

在实验中通过对不同大气参数的设定，同时假定遥感器的视场角无穷小，实际的遥感器可以通过视场内积分获得。为提高模拟的的可靠性，模拟的光子数为 1500 万，由此得到不同条件下光子的分布图。图 1 显示了以 $0.4 \mu\text{m}$ 的相同波长和 7 km 的相同能见距、分别用遥感器以 0° 、 30° 和

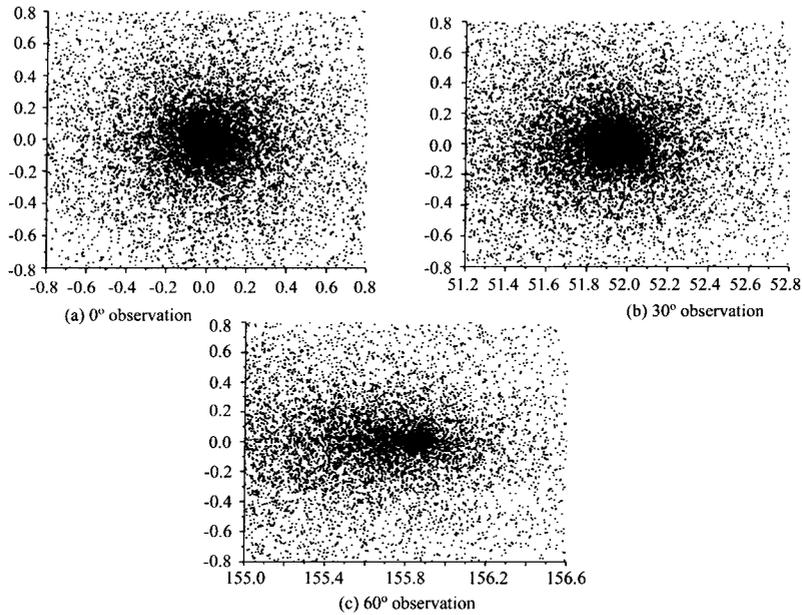


图 1 不同观测角下的光子分布

Fig.1 Photons diffusion of different observation angles

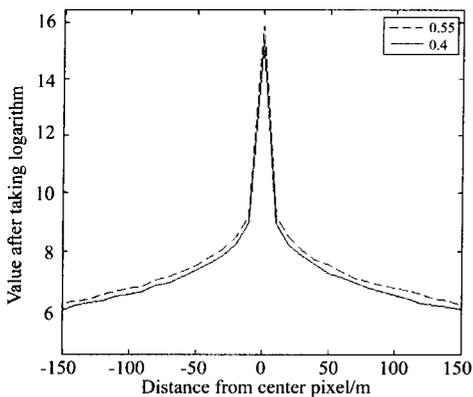


图 2 两种波长条件下的点扩散函数

Fig.2 Point spread function in two kind of waves condition

60° 观测角条件进行模拟所得到的光子分布。

4 实验结果分析

光子在视场内的分布即是我们所求的大气点扩散函数，为研究不同大气对遥感图像的影响，我们通过假设不同的条件对大气点扩散函数进行了模拟。

4.1 垂直观测下点扩散函数的变化

基于遥感器垂直观测条件下，模拟了不同的波长、能见度、遥感器高度以及气溶胶粒子的非对称因子对遥感图像数据所产生的影响。

图 2 给出了在成像高度为 90 km、能见距为 7 km 不同波长的条件下，波长 $0.55 \mu\text{m}$ (点划线)

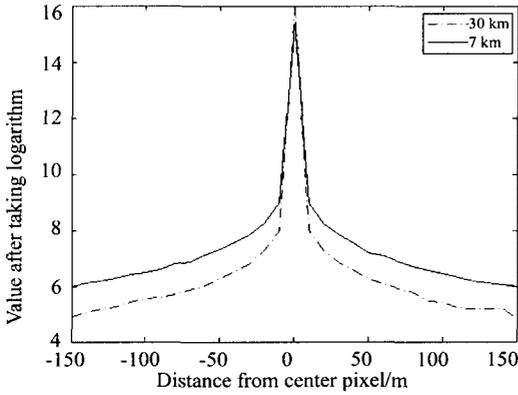


图 3 两种能见度条件下的点扩散函数

Fig.3 Point spread function in two kind of visibilities condition

出在其他条件相同的情况下, 波长越长大气的影响越小, 表现为点扩散函数宽度越小; 能见距越大, 则中心像元获得的光子数越多, 即点函数扩散函数宽度越小; 而成像高度越小, 在光学厚度相同的情况下, 光子运动距离越少, 因此扩散的程度也越小, 结果点函数扩散函数宽度越小; 非对称因子与散射颗粒尺度有关, 非对称因子越大, 前向散射越大, 点扩散函数分布越集中, 因此点扩散函数的宽度也越小。由此可见看出, 在遥感器垂直观测条件下, 不同的波长、能见度、遥感器高度以及气溶胶粒子的非对称因子对遥感图像数据会产生不同的影响。

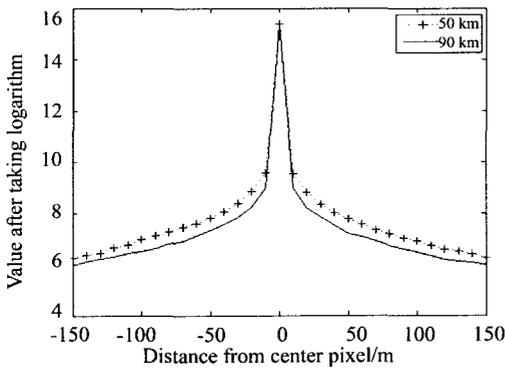


图 4 两个成像高度条件下的点扩散函数

Fig.4 Point spread function in two kind of heights condition

和 $0.4 \mu\text{m}$ (实线) 的点扩散函数。横坐标表示距象元中心点的距离, 单位为米, 纵坐标表示对光子分布数取以 e 为底的值。

图 3 给出了在波长为 $0.4 \mu\text{m}$ 、成像高度为 90 km 不同能见度的条件下, 能见度分别为 30 km(点划线) 和 7 km(实线) 的点扩散函数形式。

图 4 给出了在波长为 $0.4 \mu\text{m}$ 、能见度为 7 km 不同高度的条件下, 遥感器高度分别为 50 km(点加线) 和 90 km(实线) 的点扩散函数形式。

图 5 给出了在波长 $0.4 \mu\text{m}$ 、能见度 7 km、成像高度 90 km 不同非对称因子的条件下, 非对称因子分别为 0.9(点加线) 和 0.7(实线) 的点扩散函数形式。

分析上述四种条件下的点扩散函数, 可以看

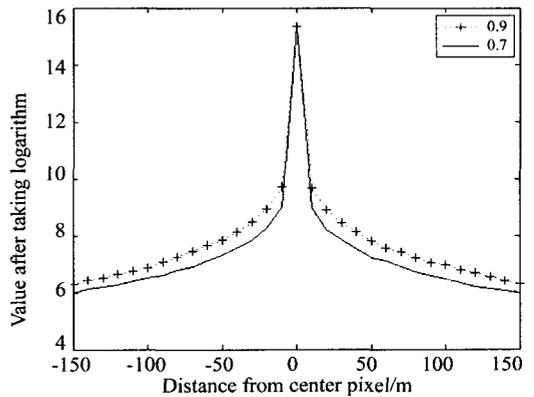


图 5 两种对称因子条件下的点扩散函数

Fig.5 Point spread function in two kind of asymmetry indices condition

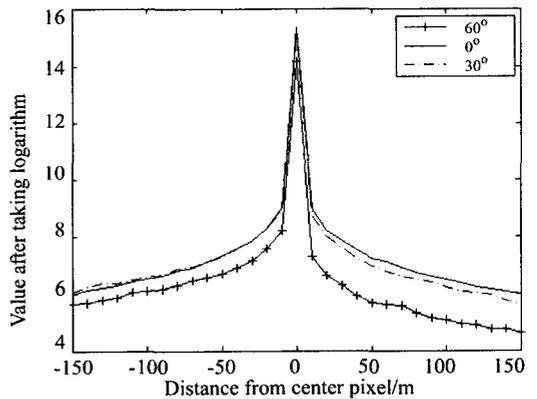


图 6 三个观测角度条件下的点扩散函数

Fig.6 Point spread function of three kinds of observation angles

4.2 斜视条件下点扩散函数的变化

在分析垂直观测条件的基础上,我们模拟了不同观测角度条件下大气点扩散函数的变化情况。图 6 是在成像高度为 90 km、波长为 0.4 μm 、能见度为 7 km 的条件下, 0° 、 30° 和 60° 三个不同观测倾角条件下的点扩散函数形式,其中实线为 0° 、点划线为 30° 、点加线为 60° 。比较三个角度条件下的点扩散函数,倾角越大,函数的左右越不对称。因此,在遥感器斜向观测条件下,点扩散函数不仅受波长、能见度、遥感器高度

以及气溶胶粒子的非对称因子的影响,还会受到遥感斜向观测角度的影响。

4.3 不同遥感观测条件下的光子分布比较

为准确掌握遥感成像过程中,光子分布在中心像元与外围像元的概率,我们对模拟结果进行了统计。表 1 统计显示了垂直观测条件下,不同波长、不同能见度条件下的点扩散函数中心像元 (10 m \times 10 m) 的贡献率;表 2 统计显示了在 30° 斜视条件下,不同波长、不同能见距的点扩散函数中心像元 (10 m \times 10 m) 的贡献率。

表 1 垂直观测条件下点扩散函数中心像元的贡献率

Table 1 Contubution rate of center pixel in vertical observation

能见度	波 长			
	0.4 μm	0.55 μm	0.8 μm	1.0 μm
5 km	38.30%	56.14%	69.53%	75.62%
7 km	46.57%	63.36%	76.04%	81.03%
15 km	60.26%	76.18%	85.67%	88.96%
27 km	66.43%	81.79%	89.73%	92.25%

表 2 30° 斜视条件下点扩散函数中心象元的贡献率

Table 2 Contubution rate of center pixel in 30° slant observation

能见度	波 长			
	0.4 μm	0.55 μm	0.8 μm	1.0 μm
5 km	33.19%	50.51%	66.14%	72.79%
7 km	41.11%	59.26%	73.20%	78.74%
15 km	55.46%	73.24%	83.82%	87.53%
27 km	62.17%	79.36%	88.37%	91.23%

5 结 论

大气点扩散函数是反映大气对遥感图像数据质量影响的重要参数,基于蒙特卡罗方法对不同大气条件和遥感观测条件的点扩散函数的模拟,可以看出卫星遥感图像的数据质量除与遥感器性

能有关外,还与波长、能见度、遥感器高度、气溶胶粒子的非对称因子以及遥感器观测倾角有关,模拟结果表明,上述诸因素都在一定程度上影响着遥感图像数据质量,是在遥感图像数据分析和应用中需要进行考虑的影响因素。

参考文献:

- [1] Xiao Qing, Liu Qinhuo, Li Xiaowen, et al. Analysis and correction of atmospheric cross radiation for high geometric resolution airborne remote sensing data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(6): 625-633(in Chinese).
- 肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 高分辨率机载遥感数据的交叉辐射影响及其校正 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(6): 625-633.
- [2] Reinersman P N, Carder K L. Monte Carlo simulation of the atmospheric point-spread function with an application to correction for the adjacency effect [J]. *Optical Society of America*, 1995, 34(21): 4453-4471.
- [3] Karl I G. *Monte Carlo Simulations of Radiative Transport in the Atmosphere and Ocean* [D]. Bergen: Master Thesis of Department of Physics, University of Bergen. 2001: 1-82.
- [4] Chervet P, Lavigne C, Roblin A, et al. Effects of aerosol scattering phase function formulation on point-spread-function calculations [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(30): 6489-6498.
- [5] Xu Xiru, Wang Pingrong. Computing atmospheric point spread function by Monte-Carlo method [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1994, 3(4): 268-278(in Chinese).
- 徐希孺, 王平荣. 用蒙特 - 卡罗方法计算大气点扩散函数 [J]. *遥感学报*, 1999, 3(4): 268-278.
- [6] Xue Yan. *Research on the Property of Light Spectrum Propagation and Scattering in Atmosphere and its Application* [D]. Xi'an: Master Thesis of Xi'an Electronic Science and Technology University, 2001: 17-40(in Chinese).
- 薛妍. 大气光谱辐射传输与散射特性及应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学硕士学位论文, 2001: 17-40.
- [7] Zhang Hanlu. *Study on the Light Scattering Characteristics of Earth Surface under Atmosphere* [D]. Xi'an: Master Thesis of Xi'an Electronic Science and Technology University, 2006: 34-54(in Chinese).
- 张涵璐. 大气背景下的地物光散射特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学硕士学位论文, 2006: 34-54.
- [8] Ren Xiaohong. *Research on Characteristic of Laser Propagation Near Earth in Atmosphere* [D]. Xi'an: Master Thesis of Xi'an Electronic Science and Technology University, 2007: 13-17(in Chinese).
- 任小红. 激光在近地大气中水平传输特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学硕士学位论文, 2007: 13-17.
- [9] Chen Liangfu, Xu Xiru. The simulation using Monte Carlo method in vegetation canopy remote sensing [J]. *Progress in Geography*, 2000, 19(1): 25-34(in Chinese).
- 陈良富, 徐希孺. 植被遥感的 Monte Carlo 模拟研究 [J]. *地理科学进展*, 2000, 19(1): 25-34.
- [10] Pei Lucheng, Zhang Xiaoze. *The Monte Carlo Method and Its Application in Particle Transport Problems* [M]. Beijing: Science Press, 1980: 168-170(in Chinese).
- 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 168-170.
- [11] Wu Beiyong, et al. *Practical Algorithm for Atmospheric Radiative Transfer* [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 1998: 21-40(in Chinese).
- 吴北婴, 等. 大气辐射传输实用算法 [M]. 北京: 气象出版社, 1998: 21-40.

作者简介: 杜尚宇 (1983-), 男, 满族, 吉林人, 硕士研究生, 主要从事遥感信息量化处理方面的研究。