

# 长江三角洲地区地表月平均反照率的 卫星遥感研究\*

徐兴奎<sup>1,2)</sup>

P4 A

1) (中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

2) (中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要** 应用 NOAA-AVHRR 气象卫星数据, 通过近似的大气校正模型及双向反射模型, 结合地理信息系统, 建立了动态的反照率反演模型, 并反演计算了我国长江三角洲地区 1995 年 3~12 月的地表反照率。通过对诸多影响反照率变化因子的分析显示, 遥感反演结果与地表覆盖特征及气候特征基本相符。

**关键词:** 反照率; 长江三角洲; 遥感

## 1 引言

遥感反演技术是反照率获取的一个非常重要和实际的手段, 与以往气候观测和模拟不同, 遥感反演反照率有地表特征模式的支持, 观测周期较短, 一次即可获得面上的反照率, 这可以部分或完全地消除平流因子的影响(点上的模式在面上应用所造成的误差)。遥感观测的波段反射率是在特定的太阳高度角和卫星视角下的数值, 并与下垫面的几何结构有关, 因此, 目前在众多的反演模型中, 双向反射模型具有最大的应用前景。在双向反射模型中, 较为实际的反演反照率的方法是被称为“核”驱动模型, 所谓“核”就是能够描述下垫面物理、几何特征的模型, 反照率反演就是建立双向反射分布函数与“核”的线性或非线性关系。下垫面覆盖类型物理特性差别很大, 将地理信息与反演模型结合, 是提高反演精度的重要研究内容之一。但由于地表覆盖类型极其复杂并随时间动态变化, 所以需要研究应用价值更高的反演模型, 能够快速的应用 NOAA 数据反演地表反照率。根据前人的研究成果, 本文将“核驱动”模型的计算方法大为简化, 以归一化的植被指数 (NDVI) 这一地理信息作为各种模型的选取指数, 快速地反演地表反照率。

## 2 双向反射模型

自然的下垫面大多是不均匀的, 粗糙度也各自不同, 这使卫星观测的波段反射率与观测的角度密切相关<sup>[1~3]</sup>, 反射率一般随视角天顶距的增加而增加并随太阳高度角而变化<sup>[4]</sup>; 植被体更是一个动态变化的过程, 其反射特性和植物的生长发育、植物本身的

2000-05-21 收到, 2001-04-16 收到第三次修改稿

\* 中国科学院重点项目 KZ952-S1-303 及国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900 第一部分资助

颜色和种类有关, 因此必须针对不同的下垫面建立相应的动态双向反射模型。双向反射分布函数的定义为

$$f(z, \theta, \varphi) = \frac{dL(\theta, \varphi)}{dE(z, \varphi')} \quad (1)$$

$dL(\theta, \varphi)$  为反射方向的辐射率,  $dE(z, \varphi')$  为入射辐照度,  $z, \varphi'$  为入射天顶角和方位角,  $\theta, \varphi$  为反射天顶角和方位角。反照率与双向反射分布函数的关系为

$$\rho(z) = \pi^{-1} \int_{2\pi} \int_{\pi/2} f(z, \theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

$\rho(z)$  为入射角  $z$  时的反照率。

本文根据下垫面的覆盖状况选择 3 种核驱动模型, 当叶面积指数 LAI 很大时, 采用 Ross-thick 核<sup>[3]</sup>  $k_{\text{thick}}$ :

$$\begin{cases} f(z, \theta, \varphi) = c_1 k_{\text{thick}} + c_2, \\ k_{\text{thick}} = \frac{(\pi/2 - \psi)\cos\psi + \sin\psi}{\cos z + \cos\theta} - \frac{\pi}{4}; \end{cases} \quad (3)$$

当叶面积指数 LAI 极小时, 采用 Ross-thin 核<sup>[3]</sup>  $k_{\text{thin}}$ :

$$\begin{cases} f(z, \theta, \varphi) = c_1 k_{\text{thin}} + c_2, \\ k_{\text{thin}} = \frac{(\pi/2 - \psi)\cos\psi + \sin\psi}{\cos z \cos\theta} - \frac{\pi}{2}; \end{cases} \quad (4)$$

其他情况采用由 Walthall 等<sup>[4]</sup>建立的 Nilson<sup>[5]</sup>改进的核驱动模型, 形式如下:

$$f(z, \theta, \varphi) = c_0(z^2 + \theta^2) + c_1 z^2 \theta^2 + c_2 z \theta \cos\varphi + c_3 \quad (5)$$

(3)、(4)、(5) 式中  $c_0, c_1, c_2, c_3$  为待求系数;  $\psi$  为散射角。由于 LAI 难以实时获得, 所以模型中采用归一化的植被指数 NDVI 作为模型选取的判据, NDVI 直接反映了下垫面植被的覆盖信息。本文通过对两年 NDVI 数据的分析, 采用当  $\text{NDVI} \geq 0.34$  时, 选用 (3) 式的“核”; 当  $\text{NDVI} < 0.06$  时, 选用 (4) 式的“核”; 其他条件下选择 (5) 式的“核”。

### 3 地表反照率的反演计算方法

由地表和大气向上到达大气层顶的能量  $I_{\text{toa}}$  由 3 部分组成, (1) 地表反射辐射能  $I_{\text{surf}}$ ; (2) 大气的分子散射 (Rayleigh 散射)  $I_{\text{Ray}}$ ; (3) 大气中气溶胶的散射  $I_{\text{aer}}$  (图 1)。在太阳天顶角为  $z$ , 观测方向天顶角为  $\theta$ , 散射角为  $\psi$ , 方位角为  $\varphi$  时, 对于单通道, 它们之间近似关系可表示为<sup>[6]</sup>

$$I_{\text{toa}} = I_{\text{surf}}(z, \theta, \varphi) + I_{\text{Ray}}(z, \theta, \varphi) + I_{\text{aer}}(z, \theta, \varphi) \quad (6)$$

在太阳天顶角小于  $60^\circ$  时,

$$\begin{aligned} I_{\text{surf}}(z, \theta, \varphi) = & I_s \cos[R_i(z, \theta, \varphi)\tau_{\text{tot}}(z)\tau_{\text{tot}}(\theta) + r(z)R'_i(z)\tau'_{\text{tot}}(z)\tau_{\text{tot}}(\theta) \\ & + R(\theta)R_i(z, \theta, \varphi)\tau_{\text{tot}}(z)\tau'_{\text{tot}}(\theta)], \end{aligned} \quad (7)$$

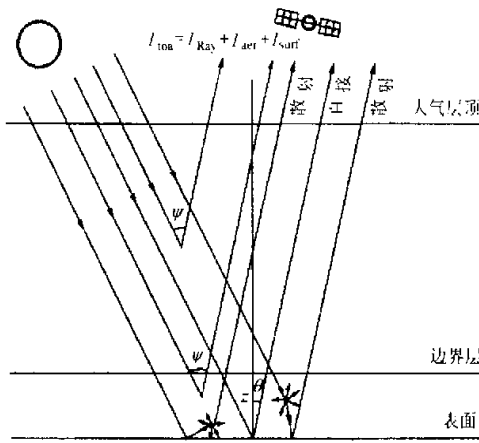


图1 可见和近红外线通道反射和散射过程图示<sup>[8]</sup>

$R_i(z, \theta, \phi)$ 为第  $i$  通道地表观测方向反射率,  $I_S$  为到达地表的入射能,  $\tau_{tot}(z)$  为大气对入射的太阳直接辐射的透过率,  $\tau_{tot}(\theta)$  为大气对反射辐射的透过率,  $r(z)$  为第  $i$  通道散射与直接太阳辐射的比率<sup>[7]</sup>,  $\tau'_{tot}(z)$  为散射辐射的透过率 ( $=120\% \tau_{tot}(z)$ )<sup>[8]</sup>,  $R'_i(z)$  为下垫面对散射辐射的反射率。(7) 式中, 大气对直射辐射在任意角度  $\zeta$  时的透过率可以近似表示为

$$\tau_{tot}(\zeta) = \exp[-(\delta_{aer} + \delta_{Ray} + \delta_{gas})\sec\zeta]. \quad (8)$$

其中  $\delta_{aer}$  为气溶胶的平均光学厚度,  $\delta_{Ray}$  为 Rayleigh 光学厚度,  $\delta_{gas}$  为气体对直接辐射的光学厚度<sup>[9]</sup>.

Rayleigh 散射表示为

$$I_{Ray}(z, \theta, \varphi) = \frac{I_S \cos z P_{Ray}(\psi)}{4(\cos z + \cos \theta)} \{1 - \exp[-\delta_{Ray}(\sec \theta + \sec z)]\} \tau_{oz}(z) \tau_{oz}(\theta), \quad (9)$$

$\tau_{oz}(z)$ ,  $\tau_{oz}(\theta)$  为臭氧透过率<sup>[10]</sup>,  $P_{Ray}(\psi)$  为散射角为  $\psi$  时 Rayleigh 散射相函数, 计算公式为

$$P_{Ray}(\psi) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \psi), \quad (10)$$

$$\psi = 180^\circ - \arccos(\cos \varphi \sin \theta \sin z + \cos \theta \cos z). \quad (11)$$

气溶胶散射能为

$$I_{aer}(z, \theta, \varphi) = \frac{I_S \cos z \tilde{\omega} P_{aer}(\psi)}{4(\cos z + \cos \theta)} \{1 - \exp[-\delta_{aer}(\sec \theta + \sec z)]\} \tau_a(z) \tau_a(\theta), \quad (12)$$

$\tilde{\omega}$  为气溶胶单次反照率, 可由 Mie 散射理论计算<sup>[11]</sup>. 气溶胶的相函数计算采用二相 Henyey-Greenstein (Two Term Henyey-Greenstein, TTHG) 形式:

$$P_{aer}(\psi) = \frac{(1 - g_1^2)a}{(1 + g_1^2 - 2g_1 \cos \psi)^{1.5}} + \frac{(1 - g_2^2)(1 - a)}{(1 + g_2^2 + 2g_2 \cos \psi)^{1.5}}, \quad (13)$$

$a$  为系数,  $g_1$ 、 $g_2$  为非对称因子, 它们依赖于气溶胶的尺度分布和波长. 根据研究<sup>[12]</sup>, 气溶胶的尺度分布是影响相函数的主要因素, 尤其在 AVHRR 的第一和第二通道, 可以认为相函数与波长无关, 对于 TTHG 模型, 选择  $a=0.962$ ,  $g_1=0.713$ ,  $g_2=0.759$ <sup>[13]</sup>, 这 3 个参数在遥感应用中已有成功的先例<sup>[14]</sup>.

大气在气溶胶中的透过率  $\tau_a(\zeta)$  近似为

$$\tau_a(z) = \exp\left[-\left(\frac{\delta_{\text{H}_2\text{O}}}{2} + \delta_{\text{gas}} + \delta_{\text{or}} + \delta_{\text{Ray}}\right)\sec z\right]. \quad (14)$$

将各分量代入(7)式中, 并假设 $R'_i(z) = R_i(z, \theta, \varphi)$ , 整理得到第 $i$ 通道方向反射率为

$$R_i(z, \theta, \varphi) = \frac{I_{\text{toa}} - I_{\text{Ray}}(z, \theta, \varphi) - I_{\text{aer}}(z, \theta, \varphi)}{I_s \cos z [\tau_{\text{tot}}(z)\tau_{\text{tot}}(\theta) + r(z)\tau'_{\text{tot}}(z)\tau_{\text{tot}}(\theta) + r(\theta)\tau_{\text{tot}}(z)\tau'_{\text{tot}}(\theta)]}. \quad (15)$$

式中 $I_{\text{toa}}$ 、 $I_s$ 的计算参考文献[15,16], 计算过程中, 除臭氧光学厚度取常数外(第一通道: 0.032; 第二通道: 0.0)<sup>[9]</sup>, 需要计算水汽、Rayleigh 散射和气溶胶的光学厚度, 各自的计算模型分别为:

水汽光学厚度 $\delta_{\text{H}_2\text{O}}$ 的计算:

在太阳光谱中, 水汽的吸收带主要分布于近红外和热红外波段, 对 NOAA-AVHRR 可见波段而言, 水汽基本没有什么影响, 因此认为第一通道水汽光学厚度为 0, 第二通道水汽光学厚度的统计模型为

$$\delta_{\text{H}_2\text{O}} = 0.0102 \lg W - 0.0346. \quad (16)$$

其中 $W$ (单位:  $\text{kg m}^{-2}$ )为单位面积上大气柱中最大可能降水量, 它和地面水汽压 $e$ (单位: hPa)的关系为<sup>[17]</sup>

$$W = 0.25e. \quad (17)$$

Rayleigh 光学厚度的近似计算:

$$\delta_{\text{Ray}} = \frac{p}{1013} \delta_{r0}, \quad (18)$$

$p$ 为实际大气压(单位: hPa),  $\delta_{r0}$ 为波段在标准 Rayleigh 大气下的光学厚度<sup>[18]</sup>,

$$\delta_{r0} = 0.00879\lambda^{-4.09}. \quad (19)$$

气溶胶光学厚度计算<sup>[19]</sup>:

$$\delta_{\text{aer}} = 0.1\lambda^{-1.3}. \quad (20)$$

为了计算宽波段(0.58~1.10  $\mu\text{m}$ )反照率, 需要将 NOAA 气象卫星 1、2 通道方向反射率合并为宽波段方向反射率 $f_i$ ,

$$f_i = w_1 R_1(z, \theta, \varphi) + w_2 R_2(z, \theta, \varphi). \quad (21)$$

$f_i$ 为双向反射分布函数的卫星实测数据序列,  $w_1$ 、 $w_2$ 各为 0.5<sup>[8]</sup>。假设在连续的数天中, 下垫面没有发生大的变化, 通过最小二乘法, 应用相应的核驱动模型求得 $c_i$ 系数, 这样针对每一象元, 可以获得动态的双向反射分布函数, 据此可以计算出 $\rho(z)$ , 根据不同的太阳入射角计算 $\rho(z)$ 序列, 平均后即计算出反照率结果。这里 NDVI 作为地理信息之一, 是选取何种“核”驱动模型的一项指标, 通过对 1982~1999 年 18 年我国逐月最大 NDVI 聚类分析得出: 当 NDVI < 0.06 时, LAI 极低; 当 NDVI > 0.34 时, LAI 表现为较大。经点和面相对比, 上述结果比较合理。另外在计算 $\rho(z)$ 时,  $z$ 要尽量接近当地中午时的太阳入射角( $\pm 15^\circ$ )。因为这时太阳波谱中短波成分大, 月平均计算结果更为准确。

## 4 计算结果和讨论

反照率定量的描述了太阳能在地表与大气间的分配比率。地表是多种地物的综合体现,并不存在单一的下垫面,即使是裸露的土壤,由于几何结构、地表湿度的影响,也会使反照率分布不均。而对于气候计算而言,需要的正是这种真实下垫面上反照率的综合分布信息。遥感信息是地理环境自然综合体的集中反映,遥感对地观测结合地理信息系统,可以获得高分辨率的地表综合空间分布信息,因此通过遥感和地理信息系统技术获得的反照率,比传统的气候学方法所获资料具有更大的应用价值。通过上述核驱动模型,本文计算了我国长江三角洲地区地表反照率的月平均分布(3~12月份)。图2(见图版)是其中4个月份的反照率分布图像显示,从中可以清晰的看出,由于下垫面类型在时空分布上的变化,影响到反照率的时空分布,但变化幅度并不是很大,且因地表覆盖类型而异(图3,见图版)。

不同地物之间对太阳光谱的反射特征差异很大,即使是同种地物,由于其几何结构的变化,也会造成地表反照率分布不均。几何结构对反照率的影响主要体现在各种植被之间覆盖率的差异,当植被覆盖率较低时,湿润的地表将占有更大的权重,综合效果将减少该地反照率值。通过1995年长江三角洲地区月平均归一化植被指数NDVI分布可看出(表1),NDVI与反照率基本保持正相关特征,即当NDVI较小时(植被覆盖率较低),反照率也较低,反之,反照率相对较大。对于长江三角洲地区年降水率较高,地表常年为植被所覆盖的地区,反照率较高值也出现在NDVI相对较大的月份。

表1 长江三角洲地区月平均归一化植被指数

3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
0.0~0.3	0.0~0.4	0.0~0.6	0.0~0.5	0.0~0.6	0.0~0.6	0.0~0.5	0.0~0.4	0.0~0.3	0.0~0.3

另外一个与植被类型有关的能够反映下垫面几何结构的参数是粗糙度。粗糙度大的表面起伏不平,反照率相对较小,因为起伏不平的表面会对太阳辐射会产生多次反射,造成反照率减小。对应粗糙度的大小(表2)会发现,粗糙度的确能够反映出地表反照率的变化特征,如:粗糙度较小的农田和落叶灌丛,反照率相对较大,而粗糙度最大的常绿阔叶林,其反照率在植被中则相对最小。

表2 几种下垫面的粗糙度<sup>[20]</sup>

m					
农田	常绿针叶林	落叶阔叶林	常绿阔叶林	常绿灌丛	落叶灌丛
0.10	0.50	0.30	1.00	0.10	0.03

地理位置和气候特征是影响各个地区反照率年际变化的两个重要因素,根据气候研究结果<sup>[21]</sup>,反照率随纬度的减小而降低,我国35°N以南地区,由于冬季降雪较少,反照率年际变化相对比较平稳。其中长江流域是我国反照率分布最小的区域,以上海地区为例,春、夏、秋、冬四季反照率平均为0.15、0.16、0.17、0.16,年振幅为0.02。长

江三角洲地区反照率计算结果基本符合这一特征, 其月平均值大多低于 0.20, 变化幅度并不很大。

在诸多气象要素中, 对反照率影响最大的是降水量, 其直接作用的结果使地表土壤湿度增大, 土壤的颜色变暗, 降低了地表反照率。长江三角洲是我国降水较充沛的地区之一, 在 1995 年全年降水量中, 月平均降水大于 100 mm 的主要集中在 3~8 月份, 其中 6 月份最大, 平均为 271.3 mm (7 个站点)。与其对应 (图 3), 6 月份除水体外, 下垫面反照率明显降低, 这主要因为土壤湿度增加, 同时下垫面植被覆盖率降低 (表 1 所示) 造成的结果。

长江三角洲地区地表覆盖类型复杂, 时空变化也很大, 如何检验上述反照率反演模型的精度是一个非常困难的问题。我们曾选择了几种典型的地物反射率, 对几种模型中不确定的参数进行了敏感检验和误差分析<sup>[22]</sup>, 其中参数的变化幅度取的基本都是极端值。结果显示, 模型本身能够保证反演精度的要求, 研究也表明<sup>[8]</sup>, 对反照率反演精度影响最大的因素是卫星各通道定标的精度。

长江三角洲地区是我国经济增长速度最快的地区之一, 其各种环境、生态变化比较显著, 变化的周期较短。其社会经济高速增长的过程中也带来了一些负面效应, 如耕地与绿地的减少, 空气质量下降等生态与环境问题。由于反照率在农业气象、水利、中长期气候数值模拟和环境监测等应用领域极其重要, 所以, 通过遥感和地理信息系统研究长江三角洲地区地表真实反照率的时空分布, 具有极高的科学价值。

#### 参 考 文 献

- 1 Suits, G., The calculation of directional reflectance of a vegetative canopy, *Remote Sens. Environ.*, 1972, 2, 117~125.
- 2 Norman, J. M. and J. M. Welles, Radiative transfer in an array of canopies, *Agronomy Journal*, 1983, 75, 481~488.
- 3 Roujean, J. L., M. Latoy and P. Y. Deschamps, A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data, *J. Geophys. Res.*, 1992, 97, 20455~20468.
- 4 Walthall, C. L., J. M. Norman, J. M. Welles, G. Campbell and B. L. Blad, Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetation canopies and bare soil surfaces, *Appl. Opt.*, 1985, 24(3), 383~387.
- 5 Nilson, T. and A. Kuusk, A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion, *Remote Sens. Environ.*, 1989, 27, 157~167.
- 6 Pinty, B. and D. Ramond, A Simple bi-directional reflectance model for terrestrial surface, *J. Geophys. Res.*, 1986, 91, 7803~7809.
- 7 Briau, N. and J. V. Dave, Effect of aerosols on the transfer of solar energy through realistic model atmospheres, Part I: Non absorbing aerosols, *J. Appl. Meteor.*, 1973, 12, 601~619.
- 8 Saunders, R. W., The determination of broad band surface albedo from AVHRR visible and near-infrared radiances, *Int. J. Remote. Sens.*, 1990, 11(1), 49~67.
- 9 Takashima, T. and Y. Takayama, Sea surface temperature measurement from space allowing for the effect of the stratospheric aerosols, *Paper in Meteorology and Geophysics*, 1986, 37, 193~204.
- 10 Tricker, R. A. R., *Introduction to Meteorological Optics*, New York: Elsevier, 1970.
- 11 Kilsby, C. G., The derivation of aerosol optical depth using AVHRR, Meteorological Research Flight Internal Note 37, England: Meteorological Office Library, Bracknell, 1987.
- 12 Aranuachapun, S., The atmospheric optical depth spectrum determined from CZCS radiance, *Int. J. Remote Sens.*, 1986, 7, 105~118.

- 13 Kattawar G. W., A three-parameter analytic phase function for multiple scattering calculation, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 1975, **15**, 839~849.
- 14 Gordon, H. R., D. K. Clark, J. W. Brown et al., Phytoplankton pigment concentration in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determination and CZCS estimates, *Appl. Opt.*, 1983, **22**, 20~36.
- 15 Price, J. C., An update on visible and near infrared calibration of satellite instruments, *Remote Sens. Environ.*, 1988, **24**, 419~422.
- 16 Neckel, H. and D. Labs, The solar radiation between 3300 and 12500Å, *Solar Physics.*, 1984, **90**, 205~258
- 17 Temps, S. R. C. and K. L. Coulson, Solar radiation incident upon slopes of different orientations, *Solar Energy.*, 1977, **19**, 179~184.
- 18 Möller, F., Strahlung in der unteren atmosphäre, in: *Handbuch der Physik*, edited by S. Flügge, Berlin, Springer-Verlag, 1957.
- 19 Singh, S. M. and R. J. Saull, The effect of atmospheric on the interpretation of multitemporal AVHRR-derived vegetation index dynamics, *Remote Sens. Environ.*, 1988, **25**, 37~51.
- 20 Briegleb, B. and V. Ramanathan, Spectral and diurnal variations in clear sky planetary albedo, *J. Appl. Meteor.*, 1982, **21**, 1160~1171.
- 21 陆渝蓉、高国栋著, 物理气候学, 北京: 气象出版社, 1987, 158.
- 22 徐兴奎、田国良、刘素红, 应用遥感和GIS在地表特征模式中应用研究, 遥感知识创新文集, 北京: 中国科学技术出版社, 1999, 85~94.

## A Study of Monthly-Mean Surface Albedo of the Yangtze River Delta

Xu Xingku<sup>1,2)</sup>

1) (Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

2) (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract** The difference of land surface features and physical characteristics is mainly mechanism that causes anisotropic distribution of albedo. Using statistic models, bidirectional reflectance models and NOAA14-AVHRR data, we retrieve and analyse the monthly mean albedo of 1995. Land-surface cover type obviously change in every year because of the human activities. This inevitably makes environment modified and often leads to global climate change though the convection of large-scale atmospheric circulation. So, a study of the land surface albedo has important scientific sense.

**Key words:** albedo; Yangtze River Delta; remote sensing



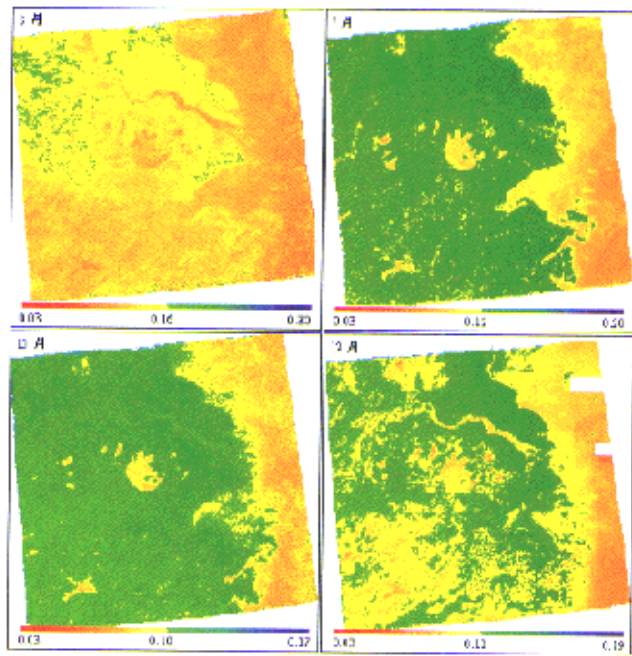


图2 月平均反照率反演结果 (3、7、10、12月份)

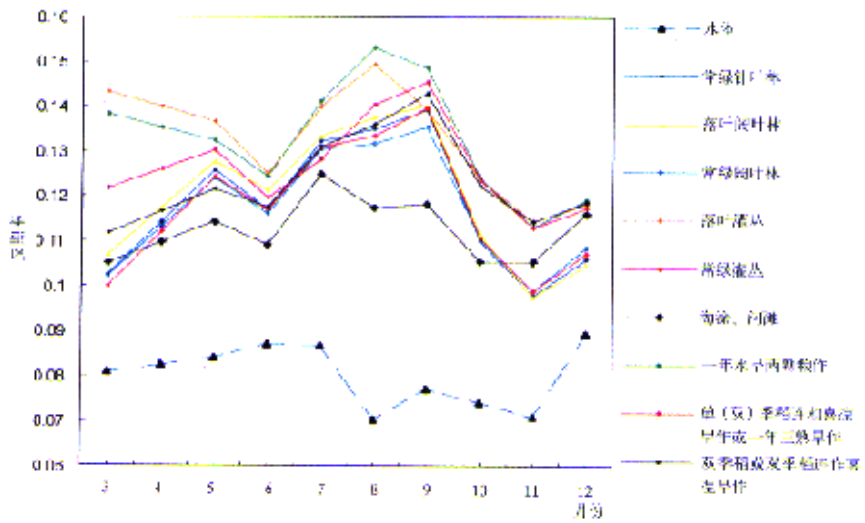


图3 各种下垫面反照率的变化