

# 卫星海洋水色遥感信息特征量的研究

潘德炉 李淑菁

(国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

**摘要** 首先从卫星海洋水色遥感机理出发,提出了水色遥感信息的两个特征量——归一化反照率(*Albedo*)和辐射信噪比(*SNR*)。其次,针对中国“九五”期间计划发射的海洋水色卫星的轨道参数和安装在卫星上的水色扫描仪(*COCTS*)水色通道为对象,以中国海区为遥感目标,通过两个特征量的模拟计算结果,进行了大洋和沿岸两类不同水体信息特征量的比较。最后,研究了信息特征量的时间和空间响应。研究的结果为中国计划发射的海洋水色卫星图像质量预测和应用潜力的评估提供了一定的科学依据。

**关键词** 海洋水色遥感,信息特征量,归一化反照率,辐射信噪比

## 1 引言

有关专家论证并建议,中国“九五”期间计划发射的海洋水色卫星的轨道高度约为800km,太阳准同步。星上装载10通道水色扫描仪(*COCTS*),通道的带宽分别为:402—422nm, 433—453nm, 480—500nm, 510—530nm, 555—575nm, 660—680nm, 745—785nm, 845—885nm, 10.3—11.4 $\mu\text{m}$ , 11.4—12.5 $\mu\text{m}$ 。*COCTS*的扫描视场角暂定为 $\pm 45^\circ$ ,每行1139个像元。海洋水色扫描仪*COCTS*主要用于海洋水色和水温探测,即叶绿素、悬浮泥沙、黄色物质等和海面温度的定量探测。由于卫星上水色扫描仪所接收到的辐射能绝大部分来自大气的干扰,而来自海面的辐射量甚低,图像的边缘像元约为2%—5%,要保证应用效益,在卫星轨道参数和传感器的技术指标确定和设计时有必要开展卫星图像质量的预测和应用潜力的评估,以避免卫星工程设计中的某些盲目性,克服以往过多地参考国外的参数和指标的状况。研究的目的在于找到能合理反映卫星水色遥感本质的信息特征量,以及发现这些信息特征量的时间与空间响应受卫星轨道参数(如轨道高度和过境地方时等)和传感器参数(如扫描视场角和各通道的中心波长等)的影响程度,为中国计划发射的海洋水色卫星图像质量预测和应用潜力的评估研究提供一定的科学依据。

## 2 卫星海洋水色遥感信息的特征量

在水色遥感中,来自大气外层的太阳光通过大气的瑞利散射和气溶胶散射,其中一部分返回到卫星水色扫描仪,一部分直射和漫散射到达海面。到达海面的直射光和天空光,其中一部分由于镜面反射穿过大气到达卫星水色扫描仪,另一部分经水面折射穿过水面。又受到水色因子如叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质等颗粒的散射,后向散射部分经水面折射离开水面,穿过大气到达卫星水色扫描仪。水次表面的另一部分继续向下到达真光层深度,或到达海底又部分反射,经折射到达扫描仪。综上所述,到达卫星水色扫描仪的辐射率可由下式计算<sup>[1]</sup>:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{sr}(\lambda) + L_w(\lambda) + L_b(\lambda) \quad (1)$$
式中; $L_t(\lambda)$ 为水色扫描仪接收到的总辐射率; $L_r(\lambda)$ 为来自大气瑞利散射的辐射率; $L_a(\lambda)$ 为来自大气的气溶胶散射的辐射率; $L_{sr}(\lambda)$ 为来自海面太阳反射光的辐射率; $L_w(\lambda)$ 为来自水面出射的辐射率; $L_b(\lambda)$ 为来自水体底部反射的辐射率;单位为 $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 。

通常,可见光不可能到达海洋的底部,所以(1)式中的最后一项 $L_b(\lambda)$ 可以忽略。因此,只要分别求得 $L_r(\lambda)$ , $L_a(\lambda)$ , $L_{sr}(\lambda)$ , $L_w(\lambda)$ 就可以通过模拟计算得到水色扫描仪的总辐射率 $L_t(\lambda)$ 。公式(1)中的 $L_r(\lambda)$ 和 $L_a(\lambda)$ 都是大气程辐射,可由下式

\* 国家自然科学基金第494934001号和国家航天办第Y96#04, Y96#05的资助项目。

收稿日期1997-04-15; 收到修改稿日期: 1997-09-01

求得<sup>[1]</sup>:

$$L_x(\lambda) = F_s \tau_x \omega_x P_x t_d(\theta_s) t_u(\theta_v) / (4\pi \cos \theta_v) \quad (2)$$

式中,  $x$  为角码, 即  $x = r$  表示瑞利散射;  $x = a$  表示气溶胶散射;  $F_s$  为太阳的照度;  $\tau_x$  瑞利或气溶胶的光学厚度;  $\omega_x$  瑞利或气溶胶的散射比;  $P_x$  为向着扫描仪的散射函数;  $t_d(\theta_s)$  和  $t_u(\theta_v)$  分别为从太阳到海面和从海面到卫星的大气透过率,  $\theta_s$  和  $\theta_v$  分别为太阳和扫描仪的天顶角<sup>[2]</sup>, 式(1)中的  $L_{sr}(\lambda)$  可由下式计算<sup>[3]</sup>:

$$L_{sr}(\lambda) = F_s t_d(\theta_s) t_u(\theta_v) t_{wu}(\theta_s) g \cos \theta_s \quad (3)$$

式中,  $t_{wu}(\theta_v)$  为水次表面到大气的透过率;  $g$  为太阳光的海面反射系数, 它主要受到风速所引起的海面的斜度影响, 是风速的函数<sup>[4]</sup>。式(1)中,  $L_w(\lambda)$  可以由下式表示<sup>[5]</sup>:

$$L_w(\lambda) = L_{ws}(\lambda) + L_{wf}(\lambda) \quad (4)$$

式中,  $L_{ws}(\lambda)$  为可见光部分(400—650nm)的离水辐射率, 它由水体次表面叶绿素浓度  $c_c$ , 悬浮泥沙浓度  $c_s$ , 黄色物质浓度  $c_y$  和水体本身的纯光学特征——吸收系数  $a$  和散射系数  $k$  的函数;  $L_{wf}(\lambda)$  为荧光部分的离水辐射率, 它是叶绿素浓度  $c_c$  和水体本身光学特征( $a, k$ )的函数; 可由以下函数形式表示<sup>[5]</sup>:

$$L_{ws}(\lambda) = F_{ws}(c_c, c_s, c_y, a, k) t_d(\theta_s) t_u(\theta_v) \quad (5)$$

$$L_{wf}(\lambda) = F_{wf}(c_c, a, k) t_d(\theta_s) t_u(\theta_v) \quad (6)$$

当海洋水色卫星的水色扫描仪观察海面时, 在不同通道的带宽范围内能到达水色扫描仪辐照度由下式计算<sup>[6]</sup>:

$$F_n = Q \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_n(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

式中,  $F_n$  为能到达第  $n$  个通道的辐照度, 单位为:  $W / (m^2 \cdot \mu m)$ ;  $Q$  为辐射率与辐照度之间的转换系数, 通常取  $\pi$ 。把各通道的辐照度  $F_n$  用相应通道带宽的大气层外的太阳辐照度  $F_{sn}$ , 通过下式来定义归一化反照率 *Albedo*:

$$Albedo = F_n / F_{sn} \quad (8)$$

然后, 水色扫描仪利用 *Albedo*, 由下式编码得到各通道的原始图像数值加到 L 或 S 波段载频往地面发送<sup>[6]</sup>:

$$D_n = (Albedo - I) / G \quad (9)$$

式中,  $G$  和  $I$  分别为水色扫描仪各通道的增益和截距, 由扫描仪的量化等级和各通道的辐射动态范围经过严格的辐射定标得到。

由公式(1)—(9)可知, 海洋水色卫星能提供的原始资料是由公式(9)所决定的图像数值  $D_n$ , 而(9)式中  $G$  和  $I$  完全由扫描仪本身所决定, 而只有归一

化反照率 *Albedo* 中包含了水体的水色信息, 于是把 *Albedo* 作为卫星海洋水色遥感信息的第一特征量。由公式(7)和(8)所知, *Albedo* 只反映了卫星各通道的总的辐射率  $L_t(\lambda)$ , 它是  $L_a(\lambda)$ ,  $L_r(\lambda)$ ,  $L_{sr}(\lambda)$ ,  $L_w(\lambda)$  之和, 而由公式(1), (5)和(6)可知, 在海洋水色遥感辐射系统中, 唯一有用的信息仅仅来自水面的离水辐射率  $L_w(\lambda)$ , 它是真正反映水色信息的物理量, 所以在 *Albedo* 这一特征量的基础上需要有一个更能反映水色信息的特征量——辐射信噪比 SNR, 定义为:

$$SNR = L_w(\lambda) / [L_t(\lambda) - L_w(\lambda)] \quad (10)$$

由上所述, 海洋水色遥感信息的第一特征量 *Albedo* 反映了卫星水色扫描仪所能接收到的总辐射能, 第二特征量反映了卫星水色扫描仪所能接收到的总辐射能中可能提取水色因子的潜在能力的物理量。

### 3 两类不同水体的特征量比较

从海洋水色遥感角度看, 可分为两大类水体, 即大洋水体简称为第一类水体 ( $W_1$ ) 和沿岸带水体简称为第二类水体 ( $W_2$ )。第一类水体的水色主要由叶绿素浓度所决定, 而第二类水体不仅由叶绿素浓度所决定, 更重要的由悬浮泥沙所决定, 其次还受到水中黄色物质的浓度的影响。研究中  $W_1$  为: 叶绿素浓度  $0.05 \text{ mg} / \text{m}^3$ , 悬浮泥沙浓度  $0.5 \text{ g} / \text{m}^3$ , 黄色物质浓度  $0.01 \text{ mg} / \text{m}^3$ ;  $W_2$  为: 叶绿素浓度  $0.5 \text{ mg} / \text{m}^3$ , 悬浮泥沙浓度  $100 \text{ g} / \text{m}^3$ , 黄色物质浓度  $0.01 \text{ mg} / \text{m}^3$ 。为了比较两类不同水体的特征量, 取大气条件参数如表 1 中的日期为夏至, 卫星过境地面时为上午 9:00, 分别计算两类不同水体条件下的 *Albedo* 和辐射信噪比 SNR, 结果表明各通道所有像元点,  $W_2$  水体的 *Albedo* 和 SNR 都比  $W_1$  水体的大。西边缘像元(像元 1)  $W_2$  的各通道平均 *Albedo* 比  $W_1$  的大 5%, 辐射信噪比大 140%; 中间像元(像元 570)的  $W_2$  比  $W_1$  大 9.8%, 辐射信噪比大 109%; 东边缘像元(像元 1139)的  $W_2$  比  $W_1$  大 2.6%, 辐射信噪比大 112%。另外, *Albedo* 随通道向长波的方向变化而减小; SNR 恰好相反, 随通道向长波的方向而增大。两类水体的辐射信噪比 SNR 随通道的变化趋势不同,  $W_2$  的 SNR 从通道 1—6 一直上升, 而  $W_1$  的 SNR 从通道 1—3 上升, 从 3 通道开始下降, 从通道 5—6 下降急剧。但是, 两类水体的 *Albedo* 随通道变化的趋势基本相同, 如图 1 所示。

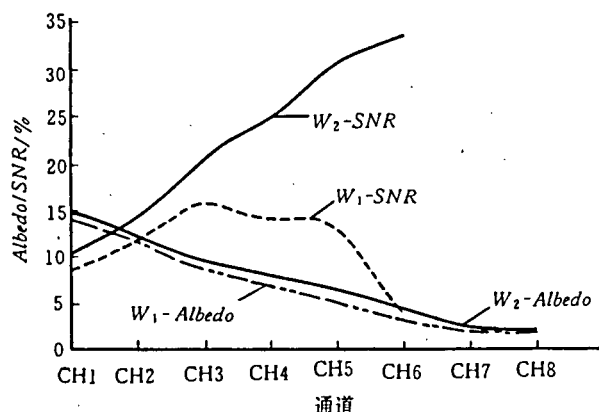


图1 在相同条件下,两类不同水体的信息特征量比较  
Fig.1 The signal characteristic scale of the two kinds of water under the same simulation condition

## 4 特征量的时间和空间响应

### 4.1 时间响应

如表 1 中的大气参数、地理位置、 $W_2$  水体分别取春分、夏至、秋分和冬至 4 个不同的日期,计算 *Albedo* 和辐射信噪比 *SNR*。

表1 星下点典型季节日期的信息特征量比较

Table 1 The signal characteristic scale of the satellite nadir pixel in the typical date of different seasons (%)

通道	<i>Albedo</i>				<i>SNR</i>			
	春分	夏至	秋分	冬至	春分	夏至	秋分	冬至
CH1	12.69	14.19	13.08	11.78	8.72	10.79	9.47	4.72
CH2	10.29	11.54	10.62	9.499	12.16	14.76	13.12	6.93
CH3	7.849	8.68	8.116	7.137	17.73	21.07	18.99	10.68
CH4	6.68	7.59	6.923	5.98	21.4	25.16	22.83	13.23
CH5	5.359	6.16	5.577	4.659	26.74	31.04	28.40	17.07
CH6	3.767	4.267	3.897	3.4	29.31	33.95	31.13	18.92
CH7	1.784	1.874	1.792	1.877	0	0	0	0
CH8	1.615	1.667	1.612	1.768	0	0	0	0
条件参数	大气	气压为1013.25mPa, 风速为1.4m/s, 能见度为10km, 月平均可降水量为1.3cm, 臭氧量0.35cm (NTP), 气溶胶前向散射比为0.75.						
	水体	叶绿素浓度为0.5mg/m <sup>3</sup> , 悬浮泥沙浓度为100g/m <sup>3</sup> , 黄色物质浓度0.01mg/m <sup>3</sup> .						
	地理	像元序数为570(星下点), 经纬度为E125°, N30°, 卫星过境地方时为上午9:00.						

由表 1 可见,夏至的 *Albedo* 和辐射信噪比 *SNR* 最大,冬季最小。各通道平均 *Albedo* 夏季比冬季大 17.6%,辐射信噪比 *SNR* 大 91.1%。

*Albedo* 与 *SNR* 除随卫星过境的日期有关外,同

时随过境的地方时而变化,在确定图像中心点的地理经纬度(为 E125°, N30°)、夏季和  $W_2$  水体等相同条件下,计算逻辑时间为 8:00—15:00 的 *Albedo* 与 *SNR*,结果表明:各通道的 *Albedo* 的时间响应,随像元的位置而变化,图像西半部像元,上午由于太阳天顶角的减小的各通道平均 *Albedo* 和 *SNR* 都增大。下午随太阳天顶角逐渐增大,太阳的耀光和气溶胶散射的剧烈增大导致 *Albedo* 继续增大,从而引起 *SNR* 的减小。图像东半部,上午由于随着太阳天顶角的减小太阳耀斑区的缩小和气溶胶散射的变小 *Albedo* 下降,到下午虽然太阳天顶角增大,但由于太阳天顶角方向的变化,太阳耀光不存在使 *Albedo* 继续下降,于是从 8:00—15:00 像元 *Albedo* 一直下降,相反像元的 *SNR* 从 8:00—15:00 一直增大。卫星星下点的区域,上午由于太阳天顶角的变小 *Albedo* 增大, *SNR* 也增大。到中午 12:00 左右 *Albedo* 最大,但 *SNR* 在 12:00 时前后有变小然后回升的变化,下午随太阳天顶角变大 *Albedo* 逐渐变小, *SNR* 也渐渐变小,从 8:00—15:00; *Albedo* 变化趋势呈弓形, *SNR* 变化趋势呈马鞍形。

为了研究扫描行所有像元随时间变化的整体响应,模拟计算了各通道扫描行所有像元的平均 *SNR*。在不同卫星过境地方时的情况,扫描行所有像元点的平均 *SNR* 图 2 所示,上午 *SNR* 渐渐上升,下午渐渐下降, *SNR* 最高点出现在 12:00 时, *SNR* 为 25.19%, 8:00 时 *SNR* 为 13.49%, 15:00 时 *SNR* 为 15.65%。由此可见,卫星过境地方时应尽量设计在中午 12:00 左右。

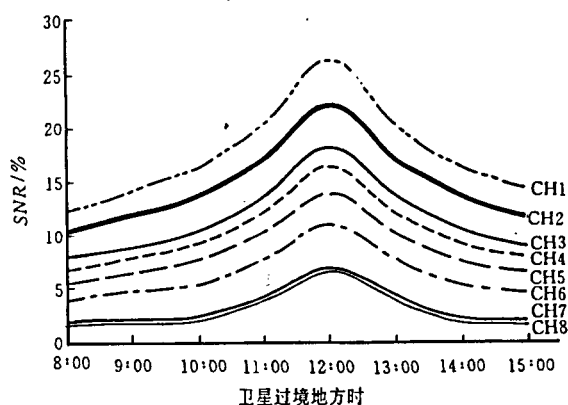


图2 *SNR* 随卫星过境地方时的变化

Fig.2 The *SNR* average of all pixels in one scan line varying with the local time of satellite pass over

### 4.2 空间响应

由于各像元点的所在地理经纬度不一样,太阳

和扫描仪的天顶角和方位角随像元而变化。本研究在表 1 的大气条件参数和日期条件下, 分别计算一扫描行内不同的像元点的 *Albedo* 和 *SNR*, 以便认识两大信息特征量的空间效应, (图 3)。由图 3 可见, 由于中心像元受到程辐射的影响最小, 它的 *Albedo* 最低。图像的东边像元, 从第 800 个像元开始受太阳耀光的影响, 到第 1000 像元点受太阳光的影响最大, 于是它的 *Albedo* 也最大, 其中太阳耀光约为通道

总辐射量的 35%—75%(随通道而变)。西边像元点主要受到瑞利散射的影响, 其 *Albedo* 居中。

相反, 正因为中心像元点受到程辐射的影响最小, 它的 *SNR* 最大, 图像东边像元点从第 800 个像元开始由于太阳耀光的影响 *SNR* 不断降低, 直到第 1000 个像元点时的 *SNR* 值最小(图 4), 比较图 3 和图 4 中曲线发现 *Albedo* 与 *SNR* 随像元位置变化的趋势正好相反。

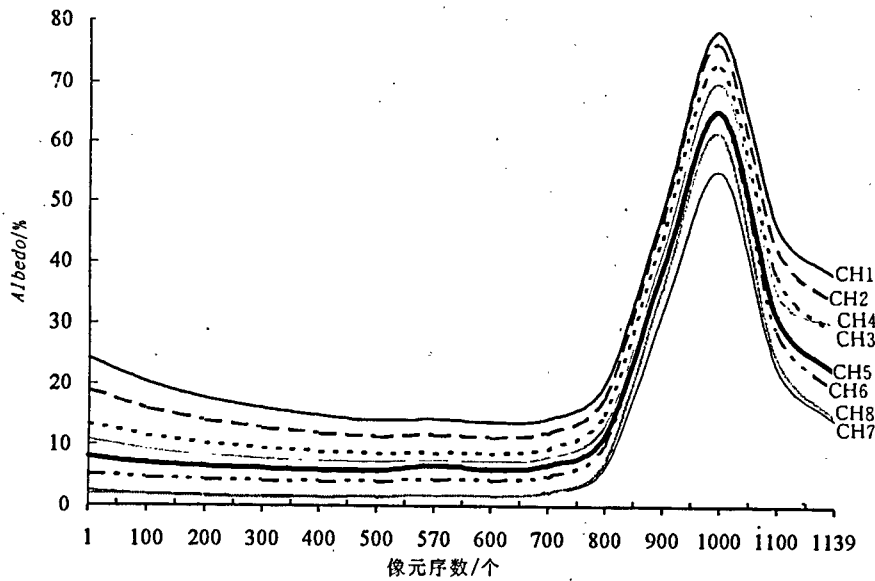


图3 *Albedo*随空间像元位置变化

Fig.3 The *Abledo* varying with the pixels in on scan line

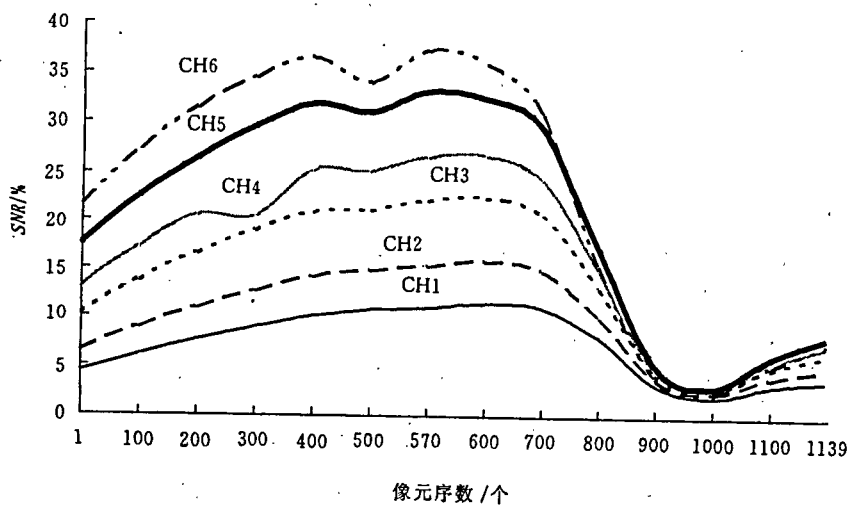


图4 *SNR*随空间像元位置变化

Fig.4 The *SNR* varying with the pixels in one scan line

## 5 结 论

(1) 中心波长越长的通道, 图像的所有像元的

*Albedo* 越小, 相反 *SNR* 越大。

(2) 第二类水体的各通道 *Albedo* 和辐射信噪比 *SNR* 都比第一类水体的大, 各通道平均 *Albedo* 大 2%—10%, 辐射信噪比 *SNR* 大 100%—140%。

(3) *Albedo* 和辐射信噪比 *SNR* 随卫星过境日期而变化,从季节看, *Albedo* 和 *SNR* 夏季比冬季分别大 17.6% 和 91.1%。 *Albedo* 和 *SNR* 随卫星过境的地方时的变化规律都随像元空间位置的变化而不同。扫描行所有像元点的平均 *SNR* 值,上午 *SNR* 上升,下午下降, *SNR* 最高点出现在 12:00 时,且此时图像像元的 *Albedo* 分布较均匀。为此,建议海洋水色卫星过赤道时 12:00 左右最佳。

(4) *Albedo* 和辐射信噪比 *SNR* 随图像的位置而变化,图像边缘像元的 *Albedo* 比卫星下点附近像元大,相反图像边缘像元的 *SNR* 比卫星下点附近的要低得多,两个特征量的空间变化趋势响应恰好相反。

(5) 在卫星轨道参数、传感器参数、大气与水体条件参数确定的情况下,太阳、传感器和海面被测目标的相对位置决定了水色信息的特征量。

#### 参 考 文 献

- 1 Gordon, H.R. Radiometric considerations for ocean colour remote sensors. *Applied Optics*, 1990, 29(3): 3228—3236.
- 2 Pan Delu, R. Doerffer, Mao Tianming, Li Shujing. A study of geographic anchor and the sun and scanner's geometric calculation for satellite scanning data. *Acta. Oceanologica Sinica*, 1996, 15(3).
- 3 Iqbal, M. A Cloudness-sky atmosphere and its optics. An introduction to solar radiation, Academic Press (Toronto, New York et Albedo): 1983, 85—155.
- 4 Sturm B. The atmospheric corrections of remotely sensed data and the qualitative determination of suspended matter in marine water surface layers. In: *Remote Sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology*, A. P. Cracknell, editor, Springer-Verlag, New York, etc., 1980, 163—197.
- 5 Doerffer, R. Application of a two-flow model for remote sensing of subsurface in water. *Boundary-Layer Meteorology*, 1980, 18: 221—232.
- 6 Pan Delu, Cho-Ten Liu *et al.* A preliminary case study on the radiance imagery of ocean colour sensors of FY-1-02 and ROCSAT-1. *Acta Oceanographica Taiwannica*, 1995, 34(2): 31—44.

#### 作 者 简 介

潘德炉,男,1945年12月出生;毕业于南京理工大学物理系;1985.5—1987.5在加拿大海洋科学研究所进修海洋遥感专业;1990.4—1992.9在德国 GKSS 研究中心从事海洋水色遥感合作研究。现为国家海洋局第二海洋研究所研究员,一直从事海洋水色遥感研究,负责国家重大海洋遥感项目。已在国内外发表有关海洋遥感的论文 50 余篇。

## A Study on the Signal Characteristic Scale of Satellite Ocean Color Remote Sensing

Pan Delu      Li Shujing

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou, 310012)

**Abstract** The ocean color satellite is mainly used to observe the water content, such as chlorophyll, suspended material and yellow substance. The total radiance arrived at the sensor in the space is divided by the solar radiation as normalized albedo and coded to send back to the ground station. The ocean color are generally determined by water content. They are monitored by measuring the water leaving radiation from ocean surface, which is a very small part of the total radiation received by the sensor. The most radiance is from atmospheric path and sun reflection of water surface. The radiation ratio of signal to noise from atmosphere etc. e.g. the ratio of the water leaving radiance to noise radiance, is characterized by the possibility of extracting the water color signals. In the paper, the signal characteristic scale (SCS)—normalized albedo and the radiation ratio of signal to noise have been firstly discussed, based on the mechanisms of the satellite ocean color remote sensing.

For the radiation transfer of the ocean-atmosphere system, the transport of solar radiation is separated into various processes, such as the molecular and the aerosol scattering. Sun reflection of water surface and water leaving radiance can be computed by the radiation models, which are depended

on the satellite orbit parameters (satellite altitude, inclination angle, crossing equator time and satellite flight direction), sensor properties (FOV, scanning rate, band wavelength), air condition (pressure, visual visibility, wind speed etc.) and water condition such as the concentration of the chlorophyll, suspended matter and yellow substance. Secondly, in the paper, it is focused on calculating the SCS of Chinese Ocean Color and Temperature Scanner (COCTS) which is being planned to be installed in the first Chinese ocean color satellite proposed to launch during the period of Chinese Ninth 'Five Plan'. Finally, the SCS response on the time and space has been studied in detail, with the calculation of SCS in various cases, such as different seasons which are substituted by the typical date Vernal Equinox, Summer Solstice, Autumn Equinox and Winter Solstice, and different satellite passing local times from 8:00 to 15:00 as well as the different pixels in one scan line. The results of the study show that the SCS is a philosophic concept provided to predict the quality and to evaluate the availability of the imagery from the Chinese COCTS.

**Key words** Ocean color remote sensing, Signal characteristic scale, Normalized albedo, Radiation ratio of signal to noise