

水色遥感理论模型探讨

程声通¹, 况昶¹, 王建平¹, 王志石², 邓育华²

(1 清华大学 环境科学与工程系 环境模拟与污染控制联合国家重点实验室, 北京 100084; 2 澳门大学 科技学院, 澳门)

摘要: 由于目前技术条件的限制, 黑箱模型在水体组份反演的研究中占据了主导地位, 但其理论基础不足, 针对具体成像条件推得的黑箱模型难以推广, 故需从水色遥感成像机理出发来研究理论模型的识别和求解。意识到辐射传输方程难以实用, 提出基于辐射传输方程求解结论的水色遥感理论模型架构。并讨论了模型的若干影响因素。特别指出, 应该使用传感器灵敏度积分的方法来关联传感器接收到的辐射率和灰度值数据, 而不是简单地使用传感器在波段中心波长处接收的辐射率。

关键词: 水色遥感; 辐射传输

中图分类号: P 237; X 87

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2002)08-1027-05

Water color remote sensing model

CHENG Shengtong¹, KUANG Chang¹, WANG Jianping¹,
WANG Zhishi², TANG U Wa²

(1 Department of Environmental Science and Engineering,
Tsinghua University; Joint State Key Laboratory of
Environmental Simulation

& Pollution Control, Beijing 100084, China;

2 Faculty of Science and Technology University of Macau,
Macau, China)

Abstract: Because of limits in current technologies, black-box models are prevalent in research analyzing water components from remote sensing data. However black-box models are not universally applicable due to their poor theoretical bases, so this paper presents a theoretical model based on the radiative transfer equation, for analyzing the remote sensing data. The results are used to analyze some influencing factor to the model architecture. The results suggest that integration based on the sensor radiometric sensitivity should be used to relate the sensor-received radiance to the remote sensing digital number, rather than simply using the sensor-received radiance in the middle wavelength of the channel.

Key words: water color remote sensing; radiative transfer

水色遥感具有获取大面积、同步性数据和相对成本较低的优势。鉴于目前技术条件的限制, 黑箱模型在水体组份反演的研究中占据了主导地位。但黑

箱模型由于其理论基础不足, 针对具体成像条件推得的黑箱模型难以推广, 从水色遥感成像机理出发来研究理论模型的识别和求解就显得尤为重要。本文不涉及辐射传输模型的求解, 而是设法给出对水色遥感成像系统的理论模型, 为此需要处理 3 个部分: 水体部分、大气部分和水-气界面。最终得出遥感数据 DN 值与水质指标挂钩的水色遥感理论模型。

1 太阳-像素-传感器几何关系

图 1 表示的是太阳-像素-传感器的几何关系。 θ 和 θ_s 为传感器和太阳的天顶角, ϕ 和 ϕ_s 为传感器和太阳的方位角。 ψ 为从太阳指向像素的矢量、与从像素指向传感器的矢量之间的夹角, ψ_r 为从像素指向反射太阳的矢量、与从像素指向传感器的矢量之间的夹角。

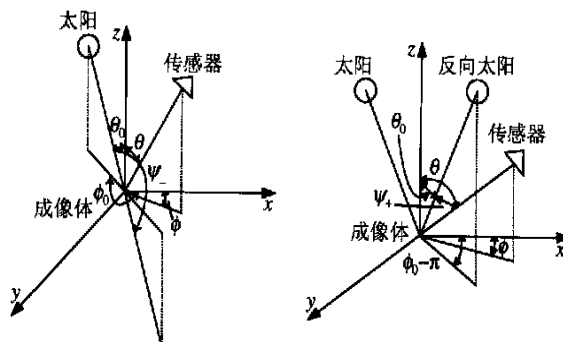


图 1 太阳-像素-传感器几何关系示意图

2 水体部分

水体辐射传输方程以一个非常微观的表达式将

收稿日期: 2001-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49971058);

教育部博士学科重点科研基金资助项目 (98000368);

澳门基金会与澳门大学资助项目

作者简介: 程声通(1939-), 男(汉), 安徽, 教授。

E-mail: cst-den@tsinghua.edu.cn

AOP (辐射率) 和 IOP (散射相函数、反照比) 联系起来。为了建立更宏观的表达式, 需要通过若干有代表性的 IOP 和边界条件求解辐射传输方程, 得到辐照度、辐射率或反射率等 AOP 的分布, 再寻找 AOP 与 IOP 的宏观关系式。

图 2 给出了 AOP 与 IOP 之间的关系以及求解思路。 AOP 和 IOP 放在不同线型的框中, 箭头指向的参数决定于箭头出发处的参数。

大框 A 是水体辐射传输方程的抽象, 其内的 IOP (主要指散射相函数) 是难以精确测定的, 但 AOP (主要指辐照度) 较易测定。大框 B 是宏观的水体辐射传输模型的抽象, 其内的 IOP (主要指吸收系数和散射系数) 直接与水体组份相关。A 框和 B 框表示的两种模型的“连接”参数是体反射率。

体反射率与水体光学性质的关系是复杂的, 影响因素也较多。文[1]讨论了体反射率与太阳高度角的关系, 发现与散射函数密切相关。但在精度允许范围内, 完全可以找出最主要的作用因素。反射率可以表示为 b_b/a (b_b 为后向散射系数, a 为吸收系数) 的简化表达式^[2], 且精度令人满意。

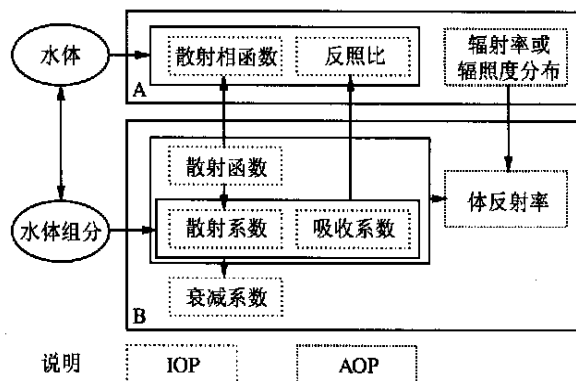


图 2 水体 AOP 与 IOP 关系图

Jerome 等选取了能够代表多种类型水体的体散射相函数、9 种边界条件 (7 个太阳天顶角下的直射入射、各向同性散射入射、心形线散射入射), 计算了所有组合情况下的 R_{RSW} (0° 深度的遥感反射率)。结论是, 对于 *nadir-viewing* 的传感器, R_{RSW} 与太阳天顶角和入射辐射的形式基本无关, 决定性因素是 b_b/a 。式 (1) 只列出 *nadir-viewing* 对应的 R_{RSW} 。

$$\begin{cases} R_{RSW}(\lambda) = 0.0053 + 0.112b_b(\lambda)/a(\lambda) - \\ \quad 0.0432[b_b(\lambda)/a(\lambda)]^2, \\ b_b(\lambda)/a(\lambda) = 0.0027 + 9.87R_{RSW}(\lambda) - \\ \quad 34.5R_{RSW}(\lambda)^2 + 1.534R_{RSW}(\lambda)^3. \end{cases} \quad (1)$$

由于辐照度是相对易于测量的指标, 上面给出的关系式就非常有用了。可利用相对容易测定的

AOP 和水体辐射传输方程来推算 IOP 。

使用式 (2) 来抽象地表示 R_v (体反射率) 和 b_b/a 的关系。

$$R_v(\lambda) = f(b_b(\lambda)/a(\lambda)). \quad (2)$$

3 大气辐射传输

对于陆地遥感的大气辐射计算, 除了要处理大气分子的 *Rayleigh* 散射和气溶胶的吸收和散射外, 还应该考虑以下因素: 不同地物本身有相当不同的反射和发射电磁波谱, 目标地物的反射效果会因为大气散射而“磨平”。水体由于后向散射占总辐射的比例较小, 故不作考虑。

大气校正理论模型是: 将传感器接收到的辐射分解为若干项后再分别处理。式 (3) 是一种典型分解方法:

$$L_t(\lambda) = L_{path}(\lambda) + T(\lambda)L_g(\lambda) + t(\lambda)L_{wc}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda). \quad (3)$$

其中: $L_{path}(\lambda)$ 是程辐射 (*path radiance*), 由大气散射和水面对天空光的镜面反射引起; $L_g(\lambda)$ 是太阳耀光, 由水面对直射太阳光的镜面反射引起; $L_{wc}(\lambda)$ 是由水面白浪对直射太阳光和天空光反射引起; $L_w(\lambda)$ 是离水辐射率; $T(\lambda)$ 和 $t(\lambda)$ 分别为大气的直射透射率和漫射透射率。

传感器应该避免接收太阳耀光, 因为强烈的太阳耀光会使传感器达到饱和, 所获取的数据没有意义。*TM* 传感器是 *nadir-viewing* 方式, 只要观测时太阳天顶角不是很小, 就不会接收到太阳耀光。*SedWIFS* 传感器有专门的倾斜机制以避免接收太阳耀光。 $L_{wc}(\lambda)$ 是由于水面白浪对直射太阳光和天空光反射而引起, 这项可不予考虑。式 (3) 简化为:

$$L_t(\lambda) = L_{path}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda). \quad (4)$$

3.1 辐射

对程辐射的处理是理论模型中最困难的部分。需将 *Rayleigh* 散射、气溶胶散射和两者之间的相互作用 (多次散射) 分离计算。这样, 程辐射表示为

$$L_{path}(\lambda) = L_R(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{Ra}(\lambda).$$

其中: $L_R(\lambda)$ 是在没有气溶胶时大气分子的 *Rayleigh* 散射; $L_a(\lambda)$ 是在没有大气分子时气溶胶的散射; $L_{Ra}(\lambda)$ 是大气分子散射和气溶胶散射之间的互相作用, 包括先被大气分子散射后又被气溶胶散射的光子和先被气溶胶散射后又被大气分子散射的光子。当只考虑单散射 (光子只被散射一次)、或多次散射很弱 (如 *Rayleigh* 散射很小, 气溶胶光学厚度很小) 时, $L_{Ra}(\lambda)$ 可以忽略。

如果只考虑单散射, 利用光学厚度的概念来统一表达瑞利单散射和气溶胶单散射:

$$\begin{cases} L_x(\lambda) = \varpi_x(\lambda) \tau_x(\lambda) F_0(\lambda) p_x(\theta, \theta_0, \lambda) / 4\pi\mu, \\ p_x(\theta, \theta_0, \lambda) = P_x(\psi_-, \lambda) + (\rho(\theta) + \rho(\theta_0)) P_x(\psi_+, \lambda), \end{cases} \quad (5)$$

$x = a, R$, 其中 $\varpi_R(\lambda) = 1$

瑞利散射相函数 $P_R(\psi_-, \lambda)$ 和 $P_R(\psi_+, \lambda)$ 有解析式为

$$P_R(\psi_{\pm}) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \psi_{\pm}). \quad (6)$$

$P_x(\psi_-, \lambda)$ 是没有与水面交互就直接被大气后向散射的光子的贡献; $P_x(\psi_+, \lambda)$ 则可以分解为以下两部分光子的贡献: 先被大气散射(天空光)到水面后再被镜像反射到传感器视角($\rho(\theta)$), 和先被水面镜像反射后再被大气散射进传感器视角($\rho(\theta_0)$).

瑞利散射的光学厚度 $\tau_R(\lambda)$ 已经有数据表格可供查阅, 气溶胶散射的光学厚度则不可能给出确定的数据, 所以上式只用于对瑞利散射的计算。

3.2 漫射透射率

离水辐射率, 白浪漫反射的辐射率的角分布是近乎统一的, 适于使用漫射透射率来描述它们在大气中的传播。上行辐射率在大气中传输时, 既会被大气分子散射以及气溶胶吸收和散射而衰减, 也会由于辐射被散射到上行方向而增加。特别地, 瑞利散射是各向同性的, 气溶胶的散射也有两方面的作用。

漫射透射率用下式表示:

$$\begin{cases} t(\lambda) = t_R(\lambda) t_{O_2}(\lambda) t_a(\lambda), \\ t_R(\lambda) = \exp(-0.5\tau_R(\lambda)/\mu), \\ t_{O_2}(\lambda) = \exp(-\tau_{O_2}(\lambda)/\mu), \\ t_a(\lambda) = \exp(-(1 - \varpi_a(\lambda)F(\lambda))\tau_a(\lambda)/\mu). \end{cases} \quad (7)$$

4 水-气界面

水-气界面的处理是通过处理反射率概念实现的, 3个反射率概念之间存在一定的关系。

4.1 离水辐射率与 0^- 深度上行辐射率

$$L_w(\lambda) = L_u(\lambda) (1 - \rho(\theta)) / n_r^2,$$

$L_u(\lambda) (1 - \rho(\theta))$ 表明 0^- 深度上行辐射率 L_u 经过水-气界面时没有被该界面反射回水体的那部分能量; n_r^2 表明由于折射作用造成的空间立体角变大而使得出水后的辐射率变小。设 θ 表示在水体中的折射角。注意到菲涅耳反射率是关于 θ 和 θ_0 轮换对称的, 上式亦可记为: $L_w(\lambda) = L_u(\lambda) (1 - \rho(\theta_0)) / n_r^2$

$\rho(\theta)$ 基本与水面风速无关^[3]。值得注意的是 nadir-viewing 的 TM 传感器, 尽管它是扫描成像的(因而必然会有一定的倾斜), 但是此角度很小。因此将其天顶角 θ 设为 θ_0 。根据菲涅耳反射公式, 利用罗必达法可以证明 $\rho(0) = (n_r - 1)^2 / (n_r + 1)^2$ 。

4.2 0^- 深度下行辐照度与 0^+ 高度下行辐照度

$$E_d(0^-, \lambda) = (1 - \bar{\rho}) E_d(0^+, \lambda),$$

式中, $\bar{\rho}$ 是两个辐照度之比。由于入射光的入射角不一, 很难简单地用一个解析式表达出数值。它与入射到水面的辐射中直射辐射和漫射辐射的比例有关。文[4]的计算表明, 此反照比与风速关系不大。文[5]计算了在 300~2400 nm 波长范围内 $\bar{\rho}$ 与太阳天顶角和水面风速的关系。结果表明, 当太阳天顶角不大于 70 时, 风速的影响很小。

4.3 0^- 深度上行辐射率与 0^- 深度上行辐照度

$$L_u(\lambda) = E_u(0^-, \lambda) / Q,$$

式中, Q 实质是描述 0^- 深度的上行辐射中辐射率所占部分。*Morel* 和 *Gentili* 针对一种非常清澈的水体, 详尽地讨论了 Q 因子与水体辐射分布、太阳天顶角以及 $IO P$ 之间的关系^[6]。对于完全的漫射光, 值为 PI , 实际介于 3.4~5, 从天顶方向转到水平方向, 上行辐射率是逐渐增大的。

4.4 反射率概念之间的关系

$$R_{RS}(\lambda) / R_{RSW}(\lambda) = (1 - \bar{\rho}) (1 - \rho(\theta)) / n_r^2,$$

$$R_{RSW}(\lambda) / R_v(\lambda) = 1/Q,$$

$$R_{RS}(\lambda) / R_v(\lambda) = (1 - \bar{\rho}) (1 - \rho(\theta)) / (Q n_r^2).$$

体反射率和离水辐射率、 0^+ 高度下行辐照度之间建立如下式所示关系:

$$L_w(\lambda) / E_d(0^+, \lambda) = (1 - \bar{\rho}) (1 - \rho(\theta)) R_v(\lambda) / Q n_r^2 \quad (8)$$

5 遥感数据 DN 值与水质指标

本节将给出一个将遥感数据 DN 值与水质指标挂钩的理论关系式。为此, 首先根据太阳在大气层顶的辐射计算 0^+ 高度的上行辐照度。大气层顶的太阳辐射同样要经过大气分子、臭氧层、气溶胶的吸收和散射, 才能到达水体表面。

$$E_d(0^+, \lambda) = F_0(\lambda) \mu_0 t_0(\lambda),$$

$$\begin{cases} F_0(\lambda) = \bar{F}_0(\lambda) [1 + e \cos[2\pi(D - 3)/365]]^2, \\ t_0(\lambda) = t_{0,R}(\lambda) t_{0,O_2}(\lambda) t_{0,a}(\lambda), \\ t_{0,R}(\lambda) = \exp[-0.5\tau_R(\lambda)/\mu_0], \\ t_{0,O_2}(\lambda) = \exp[-\tau_{O_2}(\lambda)/\mu_0], \\ t_{0,a}(\lambda) = \exp\{-[1 - \varpi_a(\lambda)F(\lambda)]\tau_a(\lambda)/\mu_0\}. \end{cases} \quad (9)$$

$\bar{F}_0(\lambda)$ 是平均地球外太阳辐射率。一年四季的阳光辐射是随日期和太阳到地球大气层的距离的变化而有微小差异的, 此差异通过儒略日 (*Julian Day*) D 体现。 $t_0(\lambda)$ 是漫射透射率, 可以按照式(7)写出; 光程由太阳天顶角 θ 决定。式(9)中各量的下标 0 表示与太阳有关。

5.1 传感器接收的辐射率与水质指标

由式(4)和程辐射的分析可得:

$$L_t(\lambda) = L_a(\lambda) + L_R(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda). \quad (10)$$

综合式(2), (5)至(10)各个表达式, 得:

$$L_t(\lambda) = C_w \bar{F}_0(\lambda) f[b_b(\lambda)/a(\lambda)] \tau_R(\lambda) t_{0,z}(\lambda) \cdot t_0(\lambda) t_{0,R}(\lambda) t_{0,Oz}(\lambda) t_{0,a}(\lambda) +$$

$$C_R \bar{F}_0(\lambda) \tau_R(\lambda) t_{0,z}(\lambda) T_{0,Oz}(\lambda) + L_a(\lambda). \quad (11)$$

其中: C_w 和 C_R 是与水质和波长无关的常数, 它们由成像条件决定, 包括成像时间、传感器的天顶角和方位角, 以及太阳的天顶角和方位角。

$$\begin{cases} C_w = (1 - \bar{\rho})(1 - \rho(\theta))/(Q n_r^2) \cdot \\ \quad \{1 + e \cos[2\pi(D - 3)/365]\}^2 \mu_0, \\ C_R = \{P(\psi) + [\rho(\theta) + \rho(\theta_*)]P(\psi_*)\} / \\ \quad (4\pi\mu) \cdot \{1 + e \cos[2\pi(D - 3)/365]\}^2. \end{cases} \quad (12)$$

5.2 传感器接收的辐射率与遥感数据DN值

传感器接收的是辐射率, 但接收站发布的数据是 DN (即灰度) 值, 如 $CZCS$ 数据是 0~1023 之间的整数, TM 数据是 0~255 之间的整数。

一般的传感器的各个波段是有一定宽度的, 陆地卫星传感器的波段范围较宽, 水色传感器的波段范围较窄。但不管哪种传感器, 某一波段的 DN 值不可能是对应于某一个确定的波长的。笔者指出, 应该使用该波段内所有波长的辐射率的加权平均值, 权重是传感器在各个波长的灵敏度 $RSR(i, \lambda)$ 。即

$$L_s(i) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RSR(i, \lambda) L_t(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RSR(i, \lambda) d\lambda = c_0(i) + c_1(i)DN. \quad (13)$$

$L_s(i)$ 表示该波段对应于 DN 值的“名义”辐射率, 它和 DN 值是通过增益值 ($gain$) c_1 和偏移值 ($bias$) c_0 联系起来的。

利用灵敏度积分是一个非常重要的改进。文献都是直接用波段的中心波长的辐射率来代表该波段

接收到的辐射率。对于以 TM 为代表的宽波段传感器, 这样的简单处理显然是不科学的。

专用水色传感器如 $CZCS$, $SeaWiFS$ 的波段的较窄 (10 nm 或 20 nm), 简单地使用中心波长的辐射率似乎是可行的。但是需要认识到: 与陆地卫星使用的宽波段传感器不同, 窄波段传感器会接收相当部分的波段外辐射, 即传感器存在波段外响应 (*out-of-band response*)。针对 $SeaWiFS$ 的灵敏度数据和波段外响应, 笔者专门从 $NASA$ 索取了两本技术报告^{*}。文[7]给出了在 1993 年初进行的发射前传感器辐射校正报告; 因 $SeaWiFS$ 发射计划一再推迟, *Johnson, et al* 在 1997 年初对其再进行一次发射前传感器辐射校正^[8]。报告表明 $SeaWiFS$ 的波段外响应还是比较明显的。图 3 是 $SeaWiFS$ 波段 8 的辐射响应图, 灵敏度数据已被归一化:

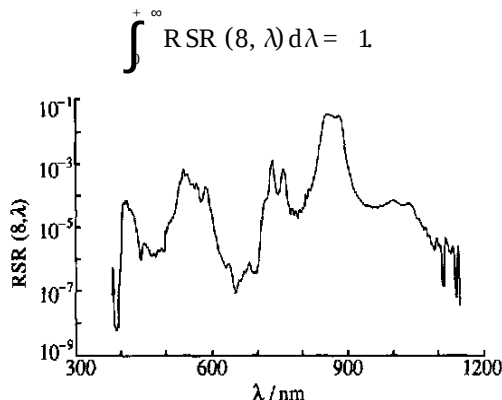


图3 SeaWiFS 波段 8 的 RSR 函数

波段 8 的名义波长范围是 845~885 nm, 但从图 3 可以看到传感器对 520~580 nm 和 750 nm 附近的辐射有较强的响应。笔者计算了这样一种方案: 如果入射辐射服从 -4 指数律 (*Rayleigh* 散射), 则波段 8 接收的辐射中有 9% 来自对短于 600 nm 的辐射的响应。

利用式(13)将传感器接收辐射率与遥感 DN 值联系是科学的处理方法。除上述 $SeaWiFS$ 数据外, 常见的传感器灵敏度数据可以在公开出版的文献或 $NASA$ 的技术报告中查阅到。

6 模型的讨论

式(11), (12), (13)构成了一个水色遥感理论模型, 其中没有出现辐射传输方程。需要指出的是, 此模型是作了若干简化的。

* *Ms Elaine Firestone, ELS, Sr. Technical Editor*

NASA/GSFC/SAIC GSC, Code 970.2, Greenbelt, MD 20771-5000, USA

Tel: (301)286-4553 Fax: (301)286-1775 Email: elaine@seawifs.gsfc.nasa.gov

1) $\rho(\theta)$, $\bar{\rho}$, Q 等均看成是常数, 忽略水面风速、太阳的天顶角和方位角的影响。

2) R_v 只表示成 b_b/a 的函数, 忽略与太阳天顶角、入射辐射形式等的关系。

3) Rayleigh 散射是按照单散射计算的。

4) 忽略 Rayleigh 散射和气溶胶散射的相互作用, 这对于清澈的大气是适用的。

5) 忽略太阳耀光和白浪引起的反射。

6) 忽略了水体深层的水质信息。

7) 忽略了水深的影响。

8) 忽略地球曲面的影响。

对于各种忽略和简化处理是可以的。有些因素, 在设计传感器时已经有考虑了, 如不会接收到太阳耀光; 有些因素被忽略, 带来的误差比较小。特别是相对于目前技术手段能够做到的水体组份反演精度来说, 作这样的忽略和近似完全是在误差允许范围内的。某些因素的影响已经有研究成果可供参考。Gordon & Castano 研究了忽略 Rayleigh 散射和气溶胶散射之间的相互作用后对大气程辐射计算带来的误差, 即使对于浑浊的大气, 误差不超过 $0.240 \text{ mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ [9]。戈登等研究了多重 Rayleigh 散射和单 Rayleigh 散射的差异, 发现两者在某些情况下会有较大的差别(如太阳天顶角和传感器天顶角均达 50° 或更大时)。Eckstein & Simpson 利用他们的方法计算了若干种情况。可以看出, 当传感器天顶角和太阳天顶角均很小时, 误差可以忽略。这很好理解, 因为两者均较小意味着太阳辐射进入水体和离水辐射率通过大气时经过的路径均比高天顶角时要小得多。特别地, 如果是 TM 传感器, 其天顶角为 0° , 将使用单 Rayleigh 散射。对于中等的太阳天顶角, 误差不超过 $0.04 \text{ mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$, 更大的太阳天顶角时误差可能能达到 $0.08 \text{ mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ [10]。忽略波浪影响对 Rayleigh 散射计算带来的误差, 相当于水体表面的大气压力有 $\pm 15 \text{ mb}$ 的误差, 或臭氧浓度有 $\pm 15 \text{ DU}$ 的误差。可见, 波浪对 Rayleigh 散射的计算结果带来的误差很小。文[11]结果表明: 当太阳天顶角 $\leq 70^\circ$ 时地球曲面的影响

完全可以忽略。当太阳天顶角 $> 70^\circ$ 时, 使用一种改进的 Rayleigh 散射计算方法可以得到准确的结果。

本文只是水色遥感的机理模型, 有了以上的简化, 该模型涉及的参数还是很多的, 使用起来有一定的困难。针对具体的案例还需要适当的技巧。

参考文献 (References)

- [1] Gordon H R. Dependence of the diffuse reflectance of natural waters on the sun angle[J]. *Limnol Oceanogr*, 1989, **34**(8): 1484 ~ 1489.
- [2] Jerome J H, Bukata R P, Bruton J E. Utilizing the components of vector irradiance to estimate the scalar irradiance in natural waters [J]. *Appl Opt*, 1988, **27**(19): 4012 ~ 4018.
- [3] Austin R W. The remote sensing of spectral radiance from below the ocean surface [A]. Jerlov N G, Steemann-Nielsen E. *Optical Aspects of Oceanography*[C]. Academic Press, 1974: 317 ~ 344.
- [4] Plass G N, Kattawar G W, Guinn Jr J A. Radiative transfer in the earth's atmosphere and ocean: Influence of waves [J]. *Appl Opt*, 1975, **14**: 1924 ~ 1936.
- [5] Masuda K, Takashima T. The effect of solar zenith angle and surface wind speed on water surface reflectivity [J]. *Remote Sens Environ*, 1996, **57**: 58 ~ 62.
- [6] Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters: II. Bidirectional aspects [J]. *Appl Opt*, 1993, **33**: 6864 ~ 6879.
- [7] Barnes R A, Holmes A W, Barnes W L, et al. SeaWiFS Technical Report Series: Vol 23, SeaWiFS Prelaunch Radiometric Calibration and Spectral Characterization. Tech Memo [R]. 104566. Greenbelt, MD, NASA, 1994.
- [8] Johnson B C, Early E E, Eplee R E, et al. SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series: Vol 4, The 1997 Prelaunch Radiometric Calibration of SeaWiFS. Tech Memo [R]. 1999-206892. Greenbelt, MD, NASA, 1999.
- [9] Gordon H R, Castano D J. The coastal zone color scanner atmospheric correction algorithm: multiple scattering effects [J]. *Appl Opt*, 1987, **26**: 2111 ~ 2122.
- [10] Gordon H R, Wang M. Surface-roughness considerations for atmospheric correction of ocean color sensors: I. the Rayleigh-scattering component [J]. *Appl Opt*, 1992, **21**: 4247 ~ 4260.
- [11] Ding K, Gordon H R. Atmospheric correction of ocean color sensors: Effects of earth curvature [J]. *Appl Opt*, 1994, **33**: 7096 ~ 7016.