# 叶绿素浓度垂直不均一分布对于分层水体表观光学特性的影响

席 颖<sup>1</sup>, 杜克平<sup>1\*</sup>, 张丽华<sup>1</sup>, Zhongping Lee<sup>2</sup>, 李小文<sup>1</sup>

1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院,遥感科学重点实验室,环境遥感与数字城市北京市重点实验室,北京 100875

2. Northern Gulf Institute, Mississippi State University, MS 39529, USA

摘要以往大部分海洋光学和海色研究都是以海洋光学有效成分及固有光学特性垂直均一分布的假设为基础进行的,然而海洋观测表明海水成分的垂直不均一性大量存在。文章通过 Hydrolight 辐射传输模拟研究了叶绿素浓度垂直不均一分布对海水表观光学特性的影响。叶绿素浓度垂直不均一分布由高斯模型来近似模拟,选择成熟的一类水体生物光学模型,利用 Hydrolight 辐射传输代码模拟表观光学特性,将垂直不均一廓线情况下模拟的表观光学特性值与具有本底值的均一廓线情况所模拟的相应值进行了比较。结果表明,水表面以下的叶绿素浓度最大值增加了蓝光波段的遥感反射率,减小了绿光波段的遥感反射率,而且改变了水体中辐射的方向分布,在叶绿素浓度最大值处,下行辐射漫衰减系数和平均余弦廓线分别出现峰值和谷值。

关键词 叶绿素浓度垂直不均一分布;遥感反射率;漫衰减系数;平均余弦 中图分类号:TP721 **文献标识码**:A **DOI**: 10. 3964/j. issn. 1000-0593 (2010) 02-0489-06

### 引 言

7

海洋在全球气候和生态系统中起着重要的作用,在现代 海洋学中,利用遥感数据监测海洋环境吸引了越来越多的关 注。以前海洋光学和海色遥感方面的研究大多基于海水固有 光学特性和光学有效组分垂直分布均一这一假设展开的。然 而,这一假设并不总是成立,部分海洋观测表明垂直不均一 性在上层水体大量存在<sup>11</sup>。这种垂直分布不均一性给理解海 色遥感提取水体光学特性的真正意义提出了一定挑战,即由 遥感反射率反演得到的水体有效成分和光学特性代表了透光 层中哪一深度,或哪些深度的平均值。

Gordon 的一系列研究<sup>[24]</sup>针对如何理解垂直不均一水体 遥感的意义等方面进行了探索。首先,Gordon 从遥感的角度 定义了光在水体中的渗透深度,即水体表层至水体中某一深 度贡献了水表面 90%的离水辐射,这一深度为光的渗透深度 Z<sub>90</sub>。进而提出了用渗透深度以上叶绿素浓度的权重平均值 作为连续分层水体的等效叶绿素浓度,提出在连续分层水体 的遥感研究中,反演得到的叶绿素浓度应当与作者提出的权 重平均值进行比较,并且建议其后的场地试验也应当将此权 重平均值列为测量参数。 Stramska 等<sup>[5]</sup>和 Xiu 等<sup>[6]</sup>分别利用辐射传输模型和半 分析性模型研究了叶绿素浓度垂直不均一分布对遥感反射率 和渗透深度的影响。研究表明,垂直均一分布和垂直不均一 分布所产生的遥感反射率 *Rrs* 差异在大多数情况下大于 5%,在极端情况下,差异可以超过70%。

为了全面分析垂直不均一分布的效应,使用类似的辐射 传输模型,进一步研究叶绿素浓度垂直不均一分布对表观光 学特性的影响,这里表观光学特性不仅包括遥感反射率 Rrs, 还有漫衰减系数  $K_d$ 以及上下行辐射的平均余弦 $\mu_d(z)$ 和 $\mu_u(z)$ 等。

## 1 叶绿素浓度垂直不均一假设下的辐射传输 模拟

#### 1.1 Hydrolight 辐射传输模型

Hydrolight 辐射传输代码已经被海洋光学和海色遥感的 研究人员所广泛使用,并经过不断的完善和验证,能够得到 较为准确的辐射分布和表观光学特性。与蒙特卡罗模拟相 比,Hydrolight 的输出结果没有统计噪声,可以模拟诸如风 吹表面,水体组分垂直分布模式,固有光学特性光谱依赖等 复杂条件下表观光学特性的变化<sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2009-01-25,修订日期: 2009-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771149)和国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714407)资助 作者简介: 席 颖, 1981 年生, 北京师范大学地理学与遥感科学学院博士研究生 e-mail:gisxiying @gmail.com \*通讯联系人 e-mail:kpdu @bnu.edu.cn

Hydrolight 辐射传输代码内置模块提供了辐射传输计算 所需要的边界条件。在计算中,假设大气能见度为 23 km, 天顶角为 40°,风速为 5 m · s<sup>-1</sup>,天空没有云。海水假设为一 类水体(Case-1 Water),且无限深。模拟深度从水表面以下至 100 m,波段包括对应于 MERIS 波段分布。具体的输入参数 如表 1 所表示。

| Table 1 | Input parameters of hydrolight |
|---------|--------------------------------|
|         | radiative transfer simulation  |

| Variable                | Input s   |
|-------------------------|---|
| Solar zenith angle      | 40 °  |
| Particle phase function | Petzold average particle                                  |
| Depth                   | 0. 01 ~ 100 m   |
| Wavelength              | 355 ~ 700 nm , wavelength corresponding<br>to Meris bands |

#### 1.2 生物光学模型

叶绿素浓度的垂直分布可以用高斯模型来近似<sup>[8]</sup>

$$c(z) = c_0 + \frac{h}{\sqrt{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - z_{\text{max}}}{2}\right)^2\right] \qquad (1)$$

式中, a) 是背景叶绿素浓度, zmax 是最大叶绿素浓度所对应的深度, 是标准偏差, h决定最大叶绿素浓度。

根据一类水体的生物光学模型,叶绿素浓度的垂直分布 廓线可以转化为水体固有光学特性(吸收系数和散射系数)的 垂直分布。在一类水体的生物光学模型中,吸收系数 *a()*可 以分解为水体各组分贡献之和

 $a(, z) = a_w() + a_p(, z) + a_{CDOM}(, z)$  (2) 式中,  $a_w()$  是纯海水的吸收系数<sup>(9)</sup>,  $a_p(, z)$  是浮游生物的 吸收系数, *a*<sub>CDOM</sub>(, z) 是有色可溶有机物的吸收系数,分别 由以下公式参数化得到<sup>[10,11]</sup>

$$a_{\rm p}(\ ,\ z) = 0.06 \, a_{\rm c}^{*}(\ ) \, c(z)^{0.05}$$
 (3)

*a*<sub>CDOM</sub>(, *z*) = 0.012*c*()<sup>0.65</sup> exp[-0.014(-440)](4) 散射系数可以由纯水和粒子物质的散射系数之和得到

$$b(, z) = b_w() + b_p(, z)$$
 (5)

式中, b<sub>e</sub>()是纯海水的散射系数<sup>(12)</sup>, b<sub>e</sub>(, z)是粒子物质 的散射系数<sup>(13)</sup>,由下式参数化得到

 $h_0(, z) = (550/) 0.03c(z)^{0.62}$  (6) 叶绿素浓度非均一分布情况下的模拟按如下方式进行:假设  $c_0 = 0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $h = 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $z_{\text{max}} = 10 \text{ m}$ , = 2 m;  $c_0 = 0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $h = 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $z_{\text{max}} = 10 \text{ m}$ , = 2 m;  $c_0 = 5.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $h = 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $z_{\text{max}} = 10 \text{ m}$ , = 2 m;  $c_0 = 5.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $h = 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $z_{\text{max}} = 10 \text{ m}$ , = 2 m;  $c_0 = 5.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $h = 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $z_{\text{max}} = 10 \text{ m}$ , = 2 m;  $c_0 = 5.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $h = 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $z_{\text{max}} = 10 \text{ m}$ , = 2 m;  $c_0 = 5.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $h = 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $z_{\text{max}} = 10 \text{ m}$ , = 2 m;  $c_0 = 6.0 \text{ m}$ ,  $(2 \sim 6 \text{ m})$   $c_1 \pm 10 \text{ m}$ ,  $c_1 = 2 \text{ m}$ ;  $c_1 = 2 \text{ m}$ ,  $c_1 = 2 \text{ m}$ ,  $c_1 = 2 \text{ m}$ ,  $c_1 = 2 \text{ m}$ ;  $c_1 = 2 \text{ m}$ ;  $c_2 = 6 \text{ m}$ )  $c_1 \pm 12 \text{ m}$ ,  $c_2 = 6 \text{ m}$ )  $c_1 \pm 12 \text{ m}$ ,  $c_1 = 2 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 6 \text{ m}$ )  $c_1 \pm 12 \text{ m}$ ,  $c_2 = 6 \text{ m}$ )  $c_1 \pm 12 \text{ m}$ ,  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_3 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_3 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_3 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_1 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 = 12 \text{ m}$ ;  $c_2 =$ 

## 2 叶绿素浓度垂直不均一分布对水体表观光 学特性的影响

#### 2.1 遥感反射率(Remote sensing reflectance)

入射到水体表面的太阳辐射,经过水体的吸收和散射作 用,只有部分辐射返回水体表面,从而被传感器接收,被接



 $c_0 = 0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  for (a) ~ (c) ;  $c_0 = 0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  for (d)

收的这部分辐射称为离水辐亮度。因为遥感反射率可以直接 由离水辐亮度得到,所以遥感反射率成为海洋水色遥感最直 接的研究对象。

叶绿素浓度垂直不均一分布对遥感反射率所产生的影响 如图 1 所示。从中可以看出,表面以下叶绿素浓度的极大值 趋向于增加绿光波段的遥感反射率,减少蓝光波段的遥感反 射率。并且当 α 和 zmax增大时,这种效应会趋于减弱。随着 α 的增加,渗透深度同时减小,叶绿素浓度峰值对遥感反射 率的贡献也会减小。类似地,当 α 保持不变, zmax增大时,叶 绿素浓度峰值对遥感反射率的贡献会越来越小,峰值所对应 的深度甚至会低于渗透深度,不会使遥感反射率产生任何变 化。

### 2 下行辐射漫衰减系数(Diffuse attenuation coefficients for down welling irradiance)

对于许多海洋学的研究,下行辐射漫衰减系数是一个重要的参数,它决定了各方向下行的太阳辐射被削弱的程度, 这对于上层水体的热量传输,水体内的光合作用,水体的浑 浊度等方面的研究都是至关重要的<sup>[14]</sup>。图2展示了叶绿素浓 度垂直不均一分布引起的下行辐射漫衰减系数的变化。





入射到水体表面的下行辐射受到吸收和散射作用的共同 削弱,吸收作用通过消灭光子来削弱下行辐射;散射作用则 通过两种途径来削弱下行辐射,一方面散射作用使原本下行 的辐射向上传输,另一方面散射作用使水体中的光场分布更 趋分散,增加了辐射的传输路径,从而增大了下行辐射被进 一步吸收和向上散射的概率<sup>[15,16]</sup>。

Kirk<sup>[15-17]</sup>通过一系列的研究将下行辐射的漫衰减系数表示为吸收和散射系数的函数

$$K_{\rm d} = \frac{1}{16} \left[ a^2 + G(\mu^0) \ ab \right]^{1/2} \tag{7}$$

式中, *a*和 *b*分别是吸收和散射系数, μ<sub>0</sub> 水面下下行辐射的平均余弦, *G*(μ<sub>0</sub>) 描述了散射系数对 *K*<sub>0</sub> 的贡献大小, 并且与 μ<sub>0</sub> 和水体的散射相位函数有关。

当叶绿素浓度垂直均一分布时,随着水体深度的增加, 光场分布更趋分散,散射所起到的削弱作用增强, Ka 不断 增大,逐渐趋近于渐近值,这与渐近理论是一致的<sup>1181</sup>。当出 现叶绿素浓度的极大值时,吸收和散射的作用明显加强,因 此下行辐射漫衰减系数的廓线也会在叶绿素浓度最大值处,

7

出现峰值,并且峰值的形态与叶绿素浓度峰值的形态一致, 即当 h和 增大时,峰值的强度会增大,宽度会变宽。 2.3 平均余弦(average cosines)

平均余弦是衡量光场角度分布的表观光学特性,上下行 辐射的平均余弦 $\mu_{u}(z)$ 和 $\mu_{u}(z)$ 的取值范围是 0~1,当辐射的 传输方向完全垂直向下或向上时, $\mu_{u}(z)$ 和 $\mu_{u}(z)$ 等于 1;当 辐射在各方向呈各向同性分布时, $\mu_{u}(z)$ 和 $\mu_{u}(z)$ 等于 1/2。 平均余弦 $\mu(z)$ 的取值范围是 - 1~1,当辐射的传输方向完全 垂直向下时, $\mu(z)$ 等于 1;当辐射在各方向呈各向同性分布 时, $\mu(z)$ 等于 0。

已经有学者就水中辐射的方向分布进行了研究,提出了 渐近理论<sup>[18-21]</sup>,即在垂直分布均一的水体中,水表面辐射的 方向分布依赖于入射辐射,随着深度增加,方向分布受到入 射辐射和水体固有光学特性的共同影响,最终在足够大的深 度只依赖于水体固有光学特性。这一理论最早由 Preisendorfer<sup>[19]</sup>提出,Zaneveld<sup>[18]</sup>将平均余弦随深度变化模拟为指数 衰减函数,Bannister<sup>[20]</sup>进一步模拟了不同太阳高度角、散射 吸收比和散射相位函数等情况下,平均余弦随深度的变化。



Fig. 3 Variations of the downwelling average cosines at 560 nm caused by nonuniform vertical distribution of chlorophyll concentration.  $c_0 = 0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 



Fig 4 Variations of the upwelling average cosines at 443 nm caused by nonuniform vertical distribution of chlorophyll concentration.  $c_0 = 0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 

Bernald<sup>[21]</sup>在此基础上分析了吸收和散射作用对平均余弦衰 减的不同作用。

图 3, 图 4 和图 5 展示了叶绿素浓度垂直不均一分布引 起的平均余弦的变化。当叶绿素浓度垂直均一分布时, 随着 水体深度的增加, 受到散射作用的影响, 辐射向各个方向分 散, 上下行辐射及总辐射的平均余弦随深度按指数函数关系

-7

递减,逐渐接近渐近值,与以往其他学者的研究一致。当出 现叶绿素浓度的极大值时,加强的散射作用使光场方向分布 更趋于各向同性,于是平均余弦在叶绿素浓度最大值处,出 现谷值,并且当 h增大时,谷值的强度会增大,但 的影响 并不明显。当深度足够大时,平均余弦依然趋近于与垂直均 一分布相同的渐近值。

### 3 结 论

本研究通过 Hydrolight 辐射传输模拟分析叶绿素浓度 垂直不均一分布对水体表观光学特性的影响进行了研究。模 拟结果显示,水表面以下的叶绿素浓度最大值增加了蓝光波 段的遥感反射率,减小了绿光波段的遥感反射率,并且当叶 绿素浓度本底值和最大叶绿素浓度对应的深度减小时,这种 效应会更加明显。同时,叶绿素浓度垂直不均一分布还改变 了水体中辐射的方向分布,在叶绿素浓度最大值处,光场更 多地向各个方向分散,水体对辐射的削弱作用更强,于是下 行辐射漫衰减系数和平均余弦廓线分别出现峰值和谷值。



Fig 5 Variations of the average cosines at 665nm caused by nonuniform vertical distribution of chlorophyll concentration.  $c_0 = 5.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 

本工作扩展了叶绿素浓度垂直不均一分布对水体表观光 学特性效应的研究,模拟结果给出了分层水体表观光学特性 在水体内部的垂直分布情况。由于遥感数据不仅受到水体固 有光学特性的影响,还与水体内部的光场分布有关,因而以 上研究为建立适应于分层水体的遥感反射率半分析模型,进 而探讨从遥感数据中获取叶绿素浓度垂直分布的可行性提供 了一定的基础和数据保障。

参考文献

- [1] Dandonneau Y. Oceanologica Acta, 1979, 2:133.
- [2] Gordon H R, McCluney W R. Applied Optics, 1975, 14: 413.
- [3] Gordon H R, Clark D K. Applied Optics, 1980, 19: 3428.
- [4] Gordon H R. Applied Optics, 1992, 31(12): 2116.
- [5] Stramska M, Stramski D. Applied Optics, 2005, 44(9): 1735.
- [6] Xiu P, Liu Y, Tang J. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(3): 831.
- [7] Lee Z P, Carder KL, Mobley C D, et al. Applied Optics, 1998, 37(27): 6329.
- [8] Lewis M R, Cullen J J, Platt T. Journal of Geophysical Research, 1983, 88: 2265.
- [9] Pope R M, Fry E S. Applied Optics, 1997, 36: 8710.
- [10] Prieur L , Sathyendranath S. Limnology and Oceanography , 1981 , 26: 671.
- [11] Morel A. Prog. Oceanogr, 1991, 26: 263.
- [12] Smith R C, Baker K. Applied Optics, 1981, 20: 177.
- [13] Gordon H R, Morel A. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery-A Review, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [14] Lee Z P, Du K P, Arnone R. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(c2): 02016.
- [15] Kirk J T O. Limnology and Oceanography, 1984, 29(2): 350.
- [16] Kirk J T O. Limnology and Oceanography, 1994, 39(3):702.

- [17] Kirk J T O. Limnology and Oceanography, 1991, 36(3): 455.
- [18] Preisendorfer R W. J. Mar. Res, 1959, 18: 1.
- [19] Zaneveld J R. Limnology and Oceanography, 1989, 34(8): 1442.
- [20] Bannister T T. Limnology and Oceanography, 1992, 37(4): 773.
- [21] Bernald J, Stramski D, Mobley CD, Kiefer DA. Limnology and Oceanography, 1995, 40(8): 1347.

# The Influence of Nonuniform Vertical Profiles of Chlorophyll Concentration on Apparent Optical Properties

XI Ying<sup>1</sup>, DU Keping<sup>1\*</sup>, ZHANGLi-hua<sup>1</sup>, Zhongping Lee<sup>2</sup>, LI Xiao-wen<sup>1</sup>

- Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, Beijing Normal University, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China
- 2. Northern Gulf Institute, Mississippi State University, MS 39529, USA

**Abstract** Previous researches on ocean optics and ocean color were based on the assumption that inherent optical properties and optically significant constituents of seawater are homogeneous in the vertical direction. However, oceanographic observations show that the assumption is not always exact and the vertical inhomogeneity of them exists in the upper ocean. The purpose of the present research is to study the effect of nonuniform vertical profiles of chlorophyll concentration on apparent optical properties with radiative transfer model Hydrolight. The vertical profiles of chlorophyll concentration were approximated according to a Gaussian function (Lewis et al, 1983). The apparent optical properties of seawater with nonuniform chlorophyll concentration profiles were simulated with Hydrolight radiative transfer model and case-1 bio-optical model, and then compared with those for homogenous ocean whose chlorophyll concentration was identical to the background chlorophyll concentration of inhomogenous cases. The results reveal that the subsurface maximal chlorophyll concentration increases the remote sensing reflectance at the blue wavelength and decreases it at the green wavelength, nonuniform vertical profiles of chlorophyll concentration change the diffuse attenuation coefficient profiles and the angular structure of the light field in the seawater , and the diffuse attenuation coefficients maximum and average cosines minimum appear at the depth of the maximal chlorophyll concentration.

**Keywords** The vertical distribution of chlorophyll concentration; Remote sensing reflectance; Diffuse attenuation coefficient; Average cosines

(Received Jan. 25, 2009; accepted Apr. 17, 2009)

\* Corresponding author