

东海海域典型赤潮水体反射光谱模拟研究*

何 烁 楼琬林^① 史爱琴 厉冬玲 王 隽 张华国

(卫星海洋环境动力学国家重点实验室 自然资源部第二海洋研究所 杭州 310012)

摘要 东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense* Lu)是我国东海海域的典型赤潮藻种,其在水体中通常呈垂直非均匀分布,并存在季节性和日内的垂直迁移现象。本文通过量化垂直迁移过程中东海原甲藻的分布状态,利用 Hydrolight 软件数值模拟各状态下的水体反射光谱,研究其光谱特征和变化规律。利用叶绿素浓度高斯垂向模型表征东海原甲藻在水体中的垂直分布,结合东海近岸海域二类水体的生物光学模型,模拟得到垂直迁移过程中东海原甲藻赤潮水体的反射光谱。对比分析叶绿素浓度垂向分布参数(背景叶绿素浓度、甲藻主体水层厚度、水体总生物量和叶绿素浓度峰值深度)对水体反射光谱的影响。研究结果表明,在东海原甲藻从次表层向表层垂直向上迁移过程中,水体反射光谱数值在蓝绿波段(400—570nm)减小,在黄红波段(570—720nm)增大,特别是在叶绿素荧光效应波段(680nm)处的变化尤为明显。

关键词 赤潮;东海原甲藻;垂直迁移;高斯分布;遥感反射光谱

中图分类号 P733 doi: 10.11693/hyh20181100272

东海原甲藻是我国东海主要的赤潮优势藻种,近十几年来每年春季都在浙闽沿岸海域形成大规模赤潮,并经常与米氏凯伦藻等伴生,形成有毒有害赤潮(夏平等, 2007; Wang *et al.*, 2009; 郭皓等, 2015)。前人对春季东海赤潮形成机制研究表明,东海原甲藻个体 3—4 月份在水体次表层“孕育”,大量增殖后在 5—6 月份上升到水体表层形成赤潮(陈翰林等, 2006; 周名江等, 2006)。大量现场调查和观测表明,东海原甲藻除季节性的垂直迁移现象外,还有昼夜垂直迁移的习性:凌晨前个体从中下层开始往上迁移,下午 14:30 左右聚集到海水表层(王金辉, 2003)。垂直迁移能力为甲藻提供更好的生存条件和更强的环境适应性,使其相比其他微藻更具竞争优势,利于赤潮发生(齐雨藻等, 1997; 何涛, 2002; 齐雨藻, 2003)。

赤潮是大量赤潮藻细胞在水体表层聚集,导致水体变色的海洋现象。海洋水色遥感技术是当前海洋赤潮监测的重要技术手段。赤潮水体反射光谱特征是

赤潮遥感的基础,而其与水体中赤潮藻种类及其浓度、分布状态等因素密切相关。例如,由于东海原甲藻的吸收光谱在蓝绿波段间存在较大斜率,其与硅藻间的水体反射光谱差异明显(Tao *et al.*, 2013, 2015)。另外,东海原甲藻赤潮在从次表层孕育到表层爆发的过程中,水体中赤潮藻细胞是垂直非均匀分布的(戴鑫烽等, 2014),其垂直迁移导致赤潮主体水层深度的变化,加之其在可见光波段的吸收特性,势必改变水体中光学场的分布,进而影响水体的反射光谱。分析水体反射光谱对赤潮藻种及其垂向分布变化的响应特性,有益于赤潮生物量估算、叶绿素浓度反演等遥感算法研究。而探究水体反射光谱对赤潮主体水层深度变化的响应,有助于建立水体反射光谱与赤潮孕育-爆发过程所处阶段之间的联系,还可为东海原甲藻垂直迁移等现象的卫星遥感观测提供理论依据。

前人在大洋一类水体组分(叶绿素浓度)垂直非均

* 国家重点研发计划项目, 2017YFC1404300 号; 国家自然科学基金项目 41576175 号, 41576174 号, 41576172 号; NSFC-浙江两化融合联合基金项目, U1609201 号, U1709201 号; 国家自然科学基金委东海科学考察实验研究, 41649902 号; 浙江省公益技术研究工业项目, 2014C31016 号。何 烁, 硕士研究生, E-mail: 871893475@qq.com

通信作者: 楼琬林, 正高级工程师, E-mail: lxl@sio.org.cn

收稿日期: 2018-11-12, 收修改稿日期: 2018-12-17

匀分布对海洋光谱影响方面的研究工作表明, 水面以下叶绿素浓度最大值的存在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 (Stramska *et al*, 2005; Kutser *et al*, 2008; 席颖等, 2010)。对光学性质复杂的二类水体(例如赤潮孕育期间近岸水体)也已有少量研究, 叶绿素浓度垂直非均匀分布主要影响水体反射光谱的黄绿波段, 而对蓝、红波段几乎没有影响(王云飞等, 2010; 马孟泉等, 2014)。但王云飞在实验中将水体叶绿素浓度最大值设置在 10m 以深, 不符合赤潮在表层爆发时水体叶绿素浓度的垂直分布特征。另外, 由于纯海水在红光波段的强烈吸收作用(Pope *et al*, 1997), 较深的水层设置增加了海水对红光的吸收, 这可能是造成红光波段反射率数值变化不明显的原因。基于上述原因, 本文主要开展针对东海原甲藻从次表层(10m 以浅)向上垂直迁移过程中水体反射光谱特征及其变化规律研究。

本研究中首先通过模型参数化东海原甲藻在水体中的垂直非均匀分布状态, 设计出各种状态下的水体叶绿素浓度剖面, 近似模拟东海原甲藻的垂直迁移过程。利用 Hydrolight 5.3 水体光学辐射传输计算软件, 数值计算东海原甲藻水体的反射光谱, 通过分析叶绿素浓度垂直分布模型参数对水体反射光谱的影响, 研究东海原甲藻垂直迁移过程中的水体反射光谱特征及其变化规律。

1 模型与方法

对于大洋水体, 在真光层范围内, 水体中叶绿素总量与其表层浓度存在非线性相关性(Gordon *et al*, 1980), 水体中叶绿素浓度随深度的变化规律通常可以用高斯模型来近似表达(Lewis *et al*, 1983)。对于我国东海海域, 水体光学特性按剖面形态可分为均匀、线性、跃层及高斯等四种垂向分布类型(徐中伟, 2010)。

东海原甲藻赤潮的多次现场调查和观测结果表明, 甲藻个体在水体中呈垂直非均匀分布, 在次表层存在叶绿素浓度最大值, 可以用高斯分布模型来表征。本文使用由 Platt 改进后的高斯模型来表征东海原甲藻水体中叶绿素浓度的垂直分布规律(Platt *et al*, 1988)。水体叶绿素浓度 C 垂直分布 Platt 高斯模型数学表达式为:

$$C(z) = C_0 + \frac{h}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z-z_{\max})^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (1)$$

公式(1)中, C_0 为背景叶绿素浓度, 单位为 mg/m^3 。 z_{\max} 为叶绿素浓度峰值所在深度, 单位为 m 。 h 为背景叶绿素浓度以上的水体总生物量, 单位为 mg/m^2 。 σ 为标准方差, 控制着由高叶绿素浓度表征的甲藻主体水层的厚度, 单位为 m , 95%的总生物量出现在叶绿素浓度峰值深度 $\pm 2\sigma$ 范围内。此外, 水体中叶绿素浓度峰值由 $\frac{h}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ 确定, 单位为 mg/m^3 。 水体叶绿素浓度垂直分布 Platt 高斯模型如图 1 所示。

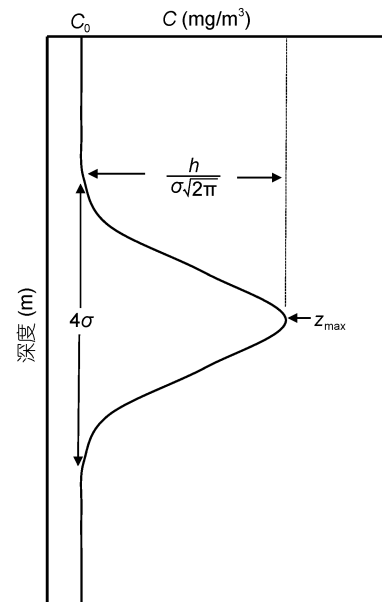


图 1 水体叶绿素浓度垂直分布高斯模型

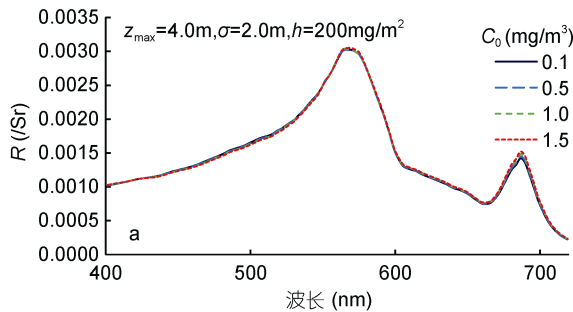
Fig.1 The Gauss vertical distribution model of chlorophyll concentration

注: C 表示叶绿素浓度; C_0 表示背景叶绿素浓度; h 表示水体生物量; z_{\max} 表示叶绿素浓度峰值深度; σ 表示标准方差

为了模拟东海原甲藻在次表层水体中的各种分布状态及其垂直迁移过程, 我们设置 z_{\max} 位于表层(0m)和次表层(10m)之间, 垂向变动步长为 1m。 C_0 共设置四个数值, 分别为 0.1、0.5、1.0、1.5 mg/m^3 。 σ 设置 4 个数值, 分别为 0.8、1.2、1.6、2.0。 h 设置 4 个数值, 分别为 50、100、150、200 mg/m^2 。 这些模拟参数的设置参考了前人研究成果及研究海域现场航次调查结果(王云飞等, 2010; He *et al*, 2018)。 在利用 Hydrolight 软件进行典型赤潮甲藻水体光谱模拟时, 还需要确定各水体组分(叶绿素、悬浮物和黄色物质)的光学特性参数。 考虑到我国东海近岸海域水体的光学复杂性, 本文选用适合浙闽沿岸海域的二类水体生物光学模型。 模型中包括对各水体组分吸收、散射

及后向散射系数的设置, 其中纯海水的吸收和散射, 选取 Pope, Fry 和 Morel 的测量结果(Pope *et al.*, 1997; Morel, 1974); 浮游植物的散射和后向散射概率选取 Gordon 和 Twardowski 的模型(Gordon *et al.*, 1980; Twardowski *et al.*, 2007); 黄色物质的吸收选取 Bricaud 的经典模型; 非藻类颗粒的吸收散射, 后向散射模型分别采用丘仲锋、宋庆君和刘炜的相应研究成果(宋庆君等, 2006; 丘仲峰等, 2007; 刘炜, 2007)。此外, 针对模拟对象东海原甲藻, 模型中藻类吸收系数采用东海原甲藻的吸收光谱测量结果(Tao *et al.*, 2013)。在模拟过程中, 设置水体中非藻类颗粒物和黄色物质垂直均匀分布, 根据前人对东海海域水体组分光学参数的测量结果, 将非藻类颗粒物的背景浓度为 $1\text{g}/\text{m}^3$, 黄色物质在 440nm 波长处的吸收系数为 0.3m^{-1} (宋庆君等, 2006; 朱建华等, 2012; 周虹丽等, 2015)。

为定量描述各实验组中反射光谱的变化程度,



本文采用遥感反射率归一化差值(ΔR)来衡量当模型参数在数值上增加设置的单位步长时, 对应的水体遥感反射率数值的变化幅度(王云飞, 2009):

$$\Delta R_{1-2} = \frac{R_1 - R_2}{R_{\max} - R_{\min}}$$

其中 R_n ($n=1, 2$) 表示参与比较的该组第 n 条遥感反射率光谱, 如 R_1-R_2 表示该组第 1 条光谱与第 2 条光谱对应各波段的数值之差, R_{\max} 表示该组参与比较的两条光谱在所有相同波段遥感反射率变化的正最大值, R_{\min} 为遥感反射率变化的负最大值。

2 结果与分析

2.1 背景叶绿素浓度的影响

为分析背景叶绿素浓度对水体反射光谱的影响, 选取水体生物量为 $200\text{mg}/\text{m}^2$, 标准方差为 2m , 叶绿素浓度峰值深度为 4m , 背景叶绿素浓度为 $0.1, 0.5, 1.0, 1.5\text{mg}/\text{m}^3$ 的 4 条光谱曲线如图 2 所示。

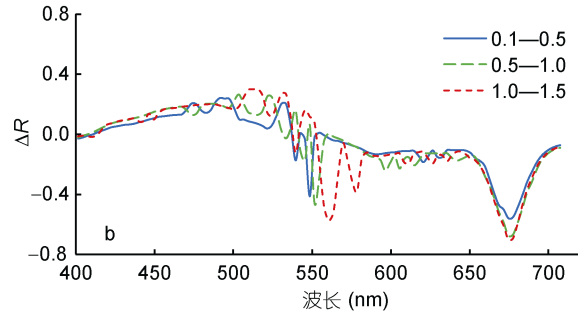


图 2 背景叶绿素浓度 C_0 对水体遥感反射率 R 的影响

Fig.2 The effect of chlorophyll background concentration C_0 on R

注: R 表示遥感反射率, ΔR 表示遥感反射率归一化差值

由图 2a 可见, 在波长 $400-560\text{nm}$ 范围内, 光谱曲线间差异很小, 背景叶绿素浓度低的光谱曲线数值稍大。在 $560-660\text{nm}$ 波长范围内, 光谱间数值差异微小, 不同光谱曲线几乎重合。在 $660-720\text{nm}$ 波长范围内, 光谱间差异也很小, 背景叶绿素浓度低的光谱曲线数值较小。在图 2b 中, 波长 $400-540\text{nm}$ 区间, ΔR 曲线数值为正, 而在大于 540nm 的波长区间, ΔR 数值几乎全为负值, 前后两个波段区间变化趋势相反。

上述对比分析表明, 较低范围内背景叶绿素浓度的变化对赤潮水体反射光谱的影响不明显, 仅在叶绿素吸收($450-550\text{nm}$)及荧光效应波段(675nm)有微弱影响。背景叶绿素浓度在较低范围内变大时, 水体反射光谱数值在蓝绿波段减小, 而在黄红波段增

加, 但光谱数值改变不大。

2.2 甲藻主体水层厚度的影响

叶绿素浓度高斯分布模型中的标准方差(σ)决定水体中高叶绿素浓度的甲藻主体水层厚度。为探究甲藻主体水层厚度对水体反射光谱的影响, 选择背景叶绿素浓度为 $1\text{mg}/\text{m}^3$, 生物量为 $200\text{mg}/\text{m}^2$, 叶绿素浓度峰值深度为 4m , 标准方差为 $0.8, 1.2, 1.6, 2.0\text{m}$ 的 4 条光谱曲线如图 3 所示。

在图 3a 中, 波长 $430-520\text{nm}$ 范围的水体反射光谱曲线数值较为接近, 变化相对较小。在 $520-720\text{nm}$ 波长区间, 光谱曲线之间的数值差异较为明显, 甲藻主体水层厚度越薄的光谱曲线数值也越小, 表明甲藻在水体次表层聚集过程中, 水体反射光谱将变小。在图 3b 中可见, 归一化差值 ΔR 在短波段数值变化

较小, 最大变化出现在 $\Delta R_{1.2-1.6}$ 的 686nm 附近, 表明甲藻主体水层厚度变化对叶绿素荧光效应波段的遥感反射率影响显著。

以高叶绿素浓度为代表的甲藻主体水层厚度变化对水体反射光谱影响明显, 尤其在荧光效应波段影响显著。在叶绿素浓度峰值深度固定时, 标准方差数值减小, 意味着甲藻主体水层厚度变薄, 甲藻在水体中更集中, 水体叶绿素浓度更高, 光束越容易被吸收, 导致水体反射光谱数值整体变小。对应在荧光效应

波段, 光束经过水层内叶绿素强烈的吸收作用后, 散射出海面的荧光光束传输距离相对变大, 被水体吸收更为严重, 使得东海原甲藻水体的荧光效应减弱。

2.3 水体总生物量的影响

水体总生物量越大意味着各水层叶绿素浓度越高。为研究水体总生物量对反射光谱的影响, 选择叶绿素浓度峰值深度为 4m, 背景叶绿素浓度为 $1\text{mg}/\text{m}^3$, 标准方差为 2m, 水体总生物量分别为 50、100、150、200 mg/m^2 的水体反射光谱曲线如图 4 所示。

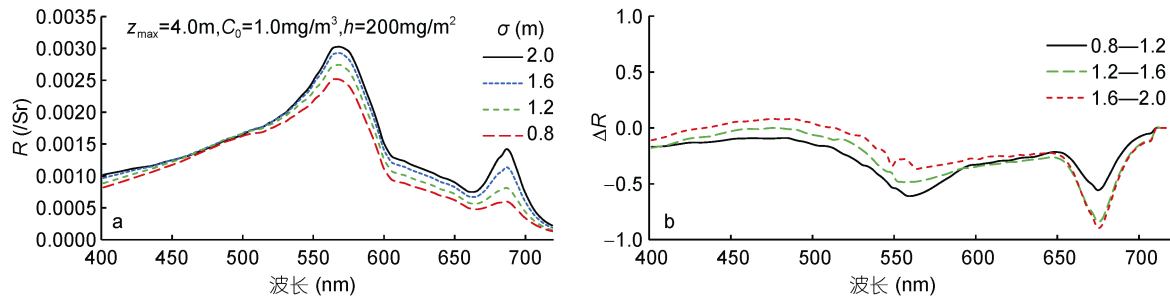


图 3 东海原甲藻主体水层深度 σ 对水体遥感反射率 R 的影响

Fig.3 The effect of the depth of *Prorocentrum donghaiense* Lu layer σ on R

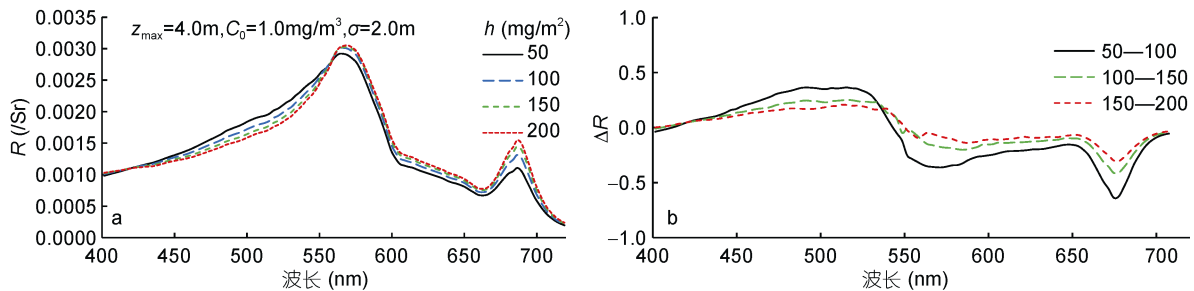


图 4 水体总生物量 h 对水体遥感反射率 R 的影响

Fig.4 The effect of the total biomass h on R

由图 4a 可见, 在波长 400—450nm、580—600nm 区间内, 水体反射光谱曲线间数值差异较小, 曲线几乎重合。在 450—580nm 波长范围, 水体总生物量越大, 水体反射光谱曲线数值越小, 光谱曲线间数值差异明显。在 600—720nm 波长区间, 总生物量越大, 光谱曲线数值越大。图 4b 中, 在 400—450nm 波长区间, 归一化差值 ΔR 的数值变化也不明显; 在 450—530nm 范围, ΔR 为正值, 最大变化值出现在 480—520nm 处; 而在 530nm 以上波长区间, ΔR 均为负值, 其中最大变化出现在总生物量为 50—100 mg/m^2 变化曲线的 675nm 波长处。

水体总生物量改变主要影响水体反射光谱的蓝绿波段和荧光效应波段, 并在 560nm 波长处出现反转现象。当总生物量增加时, 水体中叶绿素浓度变大,

更多入射光束被水体吸收, 表现为叶绿素主要吸收波段的遥感反射率减小, 同时在长波波段散射出更多的叶绿素荧光, 对应遥感反射率变大。

2.4 叶绿素浓度峰值深度的影响

叶绿素浓度峰值深度是甲藻主体水层所在的深度, 它的上下变动是东海原甲藻垂直迁移的最主要表现之一。为了探究叶绿素浓度峰值深度变化对水体遥感反射率的影响, 我们选择背景叶绿素浓度为 $1\text{mg}/\text{m}^3$, 总生物量为 $200\text{mg}/\text{m}^2$, 标准方差设为 2m, 叶绿素浓度峰值深度在 4—7m 范围内变化的水体光谱曲线如图 5 所示。

在图 5a 中, 在 430—450nm、550nm 的波长区间, 水体反射光谱间的数值变化不大。在波长 450—

550nm 范围内, 叶绿素浓度峰值深度越小, 对应光谱曲线的 R 数值也越小, 相反在 550—720nm 波长区间, 光谱曲线对应的 R 数值越大, 这两个波长区间的光谱曲线差异明显, 变化趋势相反。在图 4b 中, 400—

550nm, 归一化差值 ΔR 大部分为负值, 最大变化值出现在 500nm 附近。在 570—720nm 波段区间, ΔR 基本为正值, 其中最大变化值出现在 $\Delta R_{4.5}$ 的 680nm 波长处。

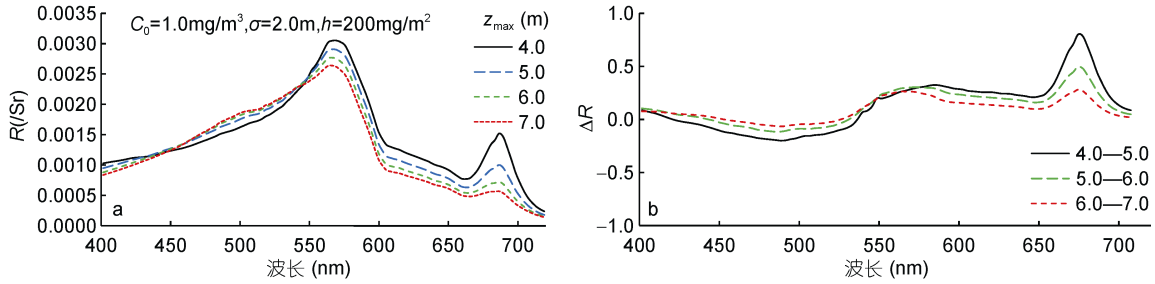


图 5 叶绿素浓度峰值深度 z_{max} 对水体遥感反射率 R 的影响
Fig.5 The effect of depth of chlorophyll maximum z_{max} on R

叶绿素浓度峰值深度改变影响水体反射光谱的蓝绿波段和黄红波段, 且变化趋势在 550nm 波长处反转。叶绿素浓度峰值深度减小, 意味着甲藻主体水层上升, 东海原甲藻从下向上垂直迁移, 表层水体中的叶绿素浓度升高, 水体对光束的吸收作用增强, 使反射光谱曲线蓝绿波段的 R 数值降低。而叶绿素荧光在向海面传输过程中经过的水层深度变浅, 水体组分对荧光光束的吸收减少, 使得 680nm 波长处荧光效应波段的反射率数值增加明显。

2.5 东海原甲藻赤潮发生过程模拟分析

在 2.4 节对东海原甲藻垂直迁移现象的模拟研究中, 假设一天内单位水柱内总生物量(包含背景值以上总生物量 h 与背景叶绿素浓度 C_0)不发生变化, 则

当叶绿素浓度峰值深度 z_{max} 小于等于 2σ 时, 只改变峰值深度 z_{max} 的情况下, 可保持单位水柱内总生物量的稳定。但是, 当峰值深度 z_{max} 小于 2σ 时, 对高斯模型而言, 需要改变模型结构才能实现单位水柱内总生物量不变。这种情况发生在东海原甲藻从次表层上升到表层, 甲藻个体在水体表层聚集, 赤潮爆发。东海原甲藻赤潮发生过程中的水体反射光谱模拟结果如图 6 所示。

从图 6a 可见, 当预设 C_0 为 $1.0\text{mg}/\text{m}^3$, σ 为 2m , h 为 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 时, z_{max} 从 4m 开始依次减小, 甲藻主体水层逐渐上升, 东海原甲藻垂直向上迁移。在只改变 z_{max} 的情况下, 当 $z_{max}=4$ 时, 水柱内总生物量 h_4 接近预设总生物量 h 的 97.7%, 可认为此时生物量没有变

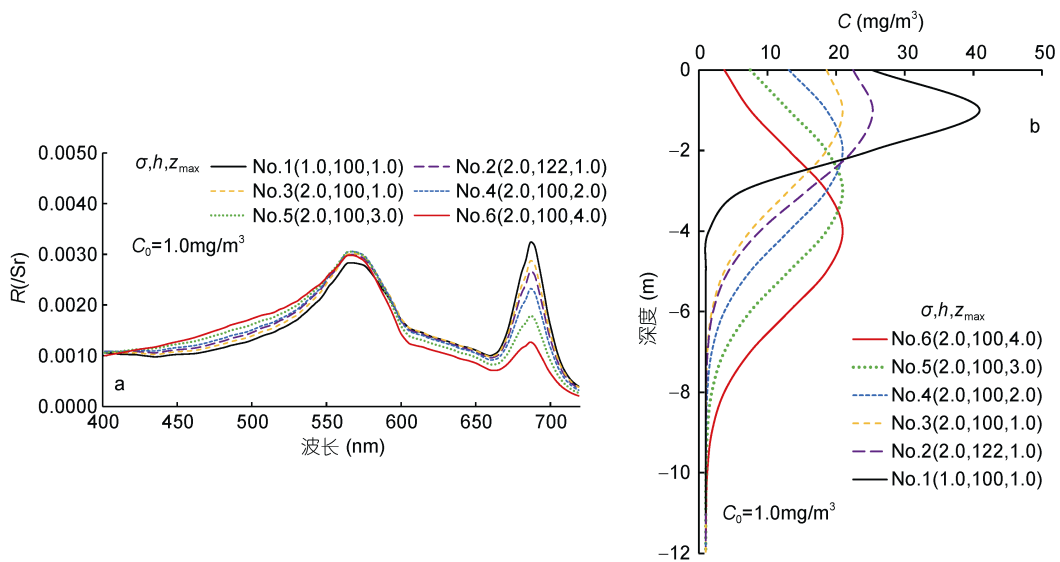


图 6 东海原甲藻赤潮发生过程中水体遥感反射率 R 变化
Fig.6 The course of R change of the *Prorocentrum donghaiense* Lu bloom

化; 当 $z_{\max}=3$ 时, 水柱内总生物量 h_3 约为预设值的 93%; 当 $z_{\max}=2$ 时, 水柱内生物量 h_2 为预设值的 84%, 这时的生物量减少已经较为明显; 当 $z_{\max}=1$ 时, 水柱内的生物量 h_1 只有预设值的 69%, 对应的水体反射光谱如图 6a 中 No.6、No.5、No.4、No.3 所示。随着 z_{\max} 的减小, 水体反射光谱曲线变化规律与前文基本一致, 其中当 $z_{\max}=2$ (No.4)和 $z_{\max}=1$ (No.3)时, 两条光谱在短波处的数值较为接近。

考虑到上述接近可能是由于单位水柱内总生物量的减少而造成的, 但这违背了水体总生物量不变的前提。因此, 需要同时改变叶绿素浓度高斯分布模型的其他参数, 来维持水体生物量平衡。以 $z_{\max}=1$ 为例分析, 要保证水柱内生物量与 $z_{\max}=2$ 时的一致, 有两种方案: 一是增加预设生物量 h , 使水柱内的生物量 h_1 同步增大, 从而保证与 h_2 数值相等, 计算表明这种方法需要将预设生物量增加到 $122\text{mg}/\text{m}^3$ 。二是减小标准方差 σ , 当 σ 减小为 1m 时, 实际生物量 h_1 与 h_2 一致。此外, 同时改变这两种参数也可以达到目的, 但参数设置过于复杂且不具有代表性, 本文不作讨论。

通过改变标准方差和生物量, 我们得到图 6b 中的水体反射光谱曲线 No.1 和 No.2。与曲线 No.3 比较, 两种方式都增加了表层水体内的叶绿素浓度, 使得光谱曲线在蓝绿波段和荧光波段的数值变化更加明显。综上, 可以看出当甲藻主体水层深度上升为 1m 时, 叶绿素浓度垂直分布剖面结构发生了明显变化, 东海原甲藻个体在表层聚集, 赤潮爆发。赤潮爆发状态下的水体反射光谱与东海原甲藻向上垂直迁移过程中的光谱特征和变化规律基本一致, 水体反射光谱在蓝绿波段 ($400\text{—}570\text{nm}$) 减小, 在黄红波段 ($570\text{—}720\text{nm}$) 增大。

3 结论

本文以东海原甲藻为例, 通过参数化典型赤潮甲藻在水体中的垂向分布状态, 来模拟典型赤潮甲藻垂直迁移过程中的水体叶绿素浓度垂直分布。利用 Hydrolight 软件数值计算了不同状态下的东海原甲藻水体的反射光谱, 分析了水体反射光谱的影响因素, 研究了水体反射光谱特征, 并探讨了典型赤潮甲藻从次表层向表层迁移到赤潮爆发过程的水体反射光谱变化规律, 得到以下结论:

(1) 叶绿素浓度垂直分布高斯模型中, 模型参数(背景叶绿素浓度、水体总生物量、甲藻主体水层厚度和叶绿素浓度峰值深度)改变对典型甲藻赤潮水体

反射光谱有不同程度的影响, 其中背景叶绿素浓度的影响相对较小。

(2) 甲藻主体水层厚度主要影响赤潮水体反射光谱绿黄红波段($520\text{—}720\text{nm}$), 主体水层厚度越薄, 甲藻个体在水体次表层越集中, 水体反射光谱数值越小。

(3) 水体总生物量改变主要影响赤潮水体反射光谱的蓝绿波段和荧光效应波段, 并在 560nm 波长处出现反转现象。当总生物量增加时, 蓝绿波段的遥感反射率减小, 荧光效应波段增大。

(4) 在东海原甲藻从次表层向表层迁移到赤潮爆发过程中, 赤潮水体反射光谱在蓝绿波段 ($400\text{—}570\text{nm}$) 减小, 在黄红波段 ($570\text{—}720\text{nm}$) 增大, 特别是在叶绿素荧光效应波段(680nm)处的变化尤为明显。

参 考 文 献

- 马孟泉, 张玉超, 钱新等, 2014. 藻类垂向分布对内陆湖泊叶绿素 a 反演算法影响的模拟研究. 红外与毫米波学报, 33(6): 666—673
- 王云飞, 2009. 东海赤潮监测卫星遥感方法研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 88—89
- 王云飞, 贺明霞, 2010. 东海赤潮多发区非均匀叶绿素浓度剖面对遥感反射比的影响. 中国海洋大学学报, 40(10): 100—104
- 王金辉, 2003. 东海赤潮生物具齿原甲藻及其特征. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 22(2): 128—131
- 丘仲锋, 唐军武, 何宜军, 2007. 东海赤潮高发区水体光谱吸收特性分析. 海洋科学集刊, (48): 6—19
- 朱建华, 周虹丽, 李铜基等, 2012. 中国近海黄色物质吸收光谱特征分析. 光学技术, 38(3): 295—299
- 刘炜, 李铜基, 朱建华等, 2007. 黄东海海区总悬浮物散射特性研究. 海洋技术学报, 26(2): 42—46
- 齐雨藻, 2003. 中国沿海赤潮. 北京: 科学出版社
- 齐雨藻, 黄长江, 钟彦等, 1997. 甲藻塔玛亚历山大藻昼夜垂直迁移特性的研究. 海洋与湖沼, 28(5): 458—467
- 何涛, 2002. 厦门筴筴湖赤潮发生的生态学研究. 厦门: 厦门大学硕士学位论文, 29—30
- 宋庆君, 唐军武, 2006. 黄海、东海海区水体散射特性研究. 海洋学报, 28(4): 56—63
- 陈翰林, 吕颂辉, 张传松等, 2006. 2004 年东海原甲藻赤潮爆发的现场调查和分析. 生态科学, 25(3): 226—230
- 周名江, 朱明远, 2006. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展. 地球科学进展, 21(7): 673—679
- 周虹丽, 朱建华, 李铜基, 2015. 中国近海黄色物质吸收光谱经验斜率特征研究. 热带海洋学报, 34(1): 23—29
- 夏平, 陆斗定, 朱德弟等, 2007. 浙江近岸海域赤潮发生的趋势与特点. 海洋学研究, 25(7): 47—56
- 徐中伟, 2010. 垂直非均匀海洋的海洋光学特性. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 45—46

- 郭 皓, 丁德文, 林凤翱等, 2015. 近 20a 我国近海赤潮特点与发生规律. 海洋科学进展, 33(4): 547—558
- 席 颖, 杜克平, 张丽华等, 2010. 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. 光谱学与光谱分析, 30(2): 489—494
- 戴鑫烽, 陆斗定, 夏 平等, 2014. 2010—2011 年东海藻华高发区水体层化对东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense* Lu)藻华的影响. 海洋与湖沼, 45(2): 217—224
- Gordon H R, Clark D K, 1980. Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation. Applied Optics, 19(20): 3428—3430
- He S, Lou X, et al, 2017. Remote sensing reflectance simulation of coastal optical complex water in the East China Sea. Proc. SPIE 10607, MIPPR 2017: Multispectral Image Acquisition, Processing, and Analysis, 106070U.
- Kutser T, Metsamaa L, Dekker A G, 2008. Influence of the vertical distribution of cyanobacteria in the water column on the remote sensing signal. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 78(4): 649—654
- Lewis M R, Cullen J J, Platt T, 1983. Phytoplankton and thermal structure in the upper ocean: consequences of nonuniformity in chlorophyll profile. Journal of Geophysical Research: Oceans, 88(C4): 2565—2570
- Morel A, Smith R C. Relation between total quanta and total energy for aquatic photosynthesis. Limnology & Oceanography, 1974, 19(4):591-600
- Platt T, Sathyendranath S, 1988. Oceanic primary production: estimation by remote sensing at local and regional scales. Science, 241(4873): 1613—1619
- Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. Applied Optics, 1997, 36(33):8710-8723
- Stramska M, Stramski D, 2005. Effects of a nonuniform vertical profile of chlorophyll concentration on remote-sensing reflectance of the ocean. Applied Optics, 44(9): 1735—1747
- Tao B Y, Pan D L, Mao Z H *et al*, 2013. Optical detection of *Prorocentrum donghaiense* blooms based on multispectral reflectance. Acta Oceanologica Sinica, 32(10): 48—56
- Tao B Y, Mao Z H, Lei H *et al*, 2015. A novel method for discriminating *Prorocentrum donghaiense* from diatom blooms in the East China Sea using MODIS measurements. Remote Sensing of Environment, 158: 267—280
- Twardowski M S, Claustre H, Freeman S A *et al*, 2007. Optical backscattering properties of the “clearest” natural waters, Biogeosciences, 4(6): 1041—1058
- Wang J H, Wu J Y, 2009. Occurrence and potential risks of harmful algal blooms in the East China Sea. Science of the Total Environment, 407(13): 4012—4021

SIMULATION AND STUDY OF REMOTE SENSING REFLECTANCE SPECTRA OF TYPICAL ALGAL BLOOMS IN THE EAST CHINA SEA

HE Shuo, LOU Xiu-Lin, SHI Ai-Qin, LI Dong-Ling, WANG Juan, ZHANG Hua-Guo

(State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract The dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* is the main algal bloom species in the East China Sea, and it usually vertically distributes inhomogeneous, and migrates vertically. In this paper, using the vertical distribution of algal cell concentration obtained through field observations, Gaussian nonuniform vertical profile model of chlorophyll concentrations was established to represent for the different vertical migration stages of *P. donghaiense*. An ocean reflectance spectra model suitable for the optical complex waters was selected and applied to simulate each stage reflectance spectra of *P. donghaiense* by using Hydrolight 5.3 software. The effects of the parameters of the Gaussian model on the reflectance spectra of the dinoflagellate algal seawater were compared and analyzed. The results shows that during the vertical upward migration of the typical dinoflagellate alga, the remote sensing reflectance spectra decreased in the blue and green band (400—570nm), and increased in the yellow and red band (570—720nm), especially in the chlorophyll fluorescence effect band (680nm).

Key words red tide; *Prorocentrum donghaiense*; vertical migration; Gauss distribution; remote sensing reflectance spectra