

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

马孟枭¹, 张玉超^{2*}, 钱新¹, 马荣华², 段洪涛²

(1. 南京大学 环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要:利用高斯模型模拟不同的藻类垂向分布结构,研究其对于典型叶绿素 a 反演算法波段比值法的影响.结果显示,藻类垂向分布不均一性导致了叶绿素 a 浓度反演结果与藻类生物量间不存在一一对应的关系;藻类分布集中于水面以及水下 0.5 m 水深时会严重干扰波段比值反演算法的准确性,说明当水体表面存在藻华现象时,将导致反演算法失效;若排除此类情况,波段比值法与水体表层 0.25 m 处叶绿素 a 浓度、0~0.25 m、0~0.5 m 水深范围内平均叶绿素 a 浓度值之间具有独立于藻类生物量以及藻类垂向分布的相关性;内陆湖泊叶绿素 a 反演算法与藻类垂向分布模型相结合,是获取藻类生物量的必要条件.

关键词:内陆湖泊;藻类垂向分布;叶绿素 a 反演算法;藻类生物量

中图分类号:TP722 **文献标识码:**A

Influence of algae vertical profiles on chlorophyll-a retrieval algorithm in inland lakes: Hydrolight simulation

MA Meng-Xiao¹, ZHANG Yu-Chao^{2*}, QIAN Xin¹, MA Rong-Hua², DUAN Hong-Tao²

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment,
Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The Gaussian model was used to describe the algae vertical profiles and analyze the influence of algae vertical profiles on band ratio algorithm via Hydrolight simulation. It indicated that there was no definite relationship between reflectance of water surface and the algae biomass because of different algae vertical profiles. The algae blooms at the water surface could lead to the failing of retrieval algorithm. Excluding algal bloom case, there were good correlation between band ratio algorithm and chlorophyll-a concentration at 0.25 m water depth or averaged chlorophyll-a concentrations at 0~0.25 / 0~0.5 m water depth, which is independent on the algae biomass and algae vertical profiles. Comprehensive consideration on chlorophyll-a concentration retrieved from remote sensing algorithm and algae vertical profiles should be an executable approach to obtain algae biomass of inland lakes.

Key words: inland lakes, the algae vertical profiles, chlorophyll-a retrieval algorithm, the algae biomass

PACS: 42.68. Ay

引言

水体中藻类会因温度、光照、风浪等许多水文气

象因子的影响,产生不同的垂向分布状态^[1].关于藻类垂向分布方面的已有研究主要侧重于分析不同水体藻类垂向分布的影响、成因及其变化规律^[2-4].

收稿日期:2013-05-26,修回日期:2014-05-19

Received date: 2013-05-26, revised date: 2014-05-19

基金项目:国家自然科学基金(41101316);太湖水体典型组分混合光谱分解算法研究;国家高技术研究发展计划(863计划)(2014AA06A509);中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划重点项目(NIGLAS2012135010)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41101316), A spectral decomposition algorithm for estimating chlorophyll-a concentrations in Lake Taihu, China; National High Technology Research and Development Program of China(2014AA06A509), and the 135-Program of NIGLAS(NIGLAS2012135010)

作者简介(Biography):马孟枭(1988-),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为湖泊环境遥感. E-mail: mmxlb369@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): yczhang@niglas.ac.cn

目前遥感技术在湖泊水华以及藻类生物量监测领域得到了广泛的成功应用^[5-7]. 通常认为, 遥感仅能获得表层水体藻类信息, 而事实上, 水体表面的表观光学属性(遥感反射比 R_{rs} 、下行辐射漫衰减系数 K_d 等)是水下不同深度处藻类生物量对光吸收、散射的综合累积影响^[8-10], 而与其与藻类垂向分布结构间的关系却缺乏深入的研究, 传统的水体表层水样采集方法也缺乏相应的水色光学的理论支撑. 因此, 研究二类水体藻类垂向分布结构对藻类反演模型的影响机制成为亟待解决的问题.

鉴于叶绿素 a 是湖泊科学和水色遥感科学衡量藻类生物量的常用指标, 文中将用单元水柱中叶绿素 a 总量来表征藻类生物量 (μg), 用叶绿素 a 浓度 ($\mu\text{g/L}$) 表征单元水柱中藻类在垂向上的分布特征. 本研究结合太湖水质特征, 通过定积分控制单元水柱内藻类生物量情况, 利用高斯模型模拟藻类多种垂向分布结构, 研究藻类垂向分布结构对太湖叶绿素 a 浓度典型反演算法的影响规律, 为富营养化湖泊水体藻类生物总量遥感估算服务.

1 研究方法

1.1 藻类垂向分布模型

选用高斯模型来近似模拟藻类浓度(叶绿素 a)的垂向分布^[11-13]:

$$c(z) = \frac{c_{\max}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_{\max}}{\sigma}\right)^2\right], \quad (1)$$

其中, $c(z)$ 为水深 z 米处的藻类浓度值, $\mu\text{g/L}$; Z_{\max} 为藻类浓度最大值对应的深度, m ; σ 是标准偏差, 决定最大值宽度的参数, m ; C_{\max} 是决定藻类浓度最大值的参数, $\mu\text{g/L}$.

1.2 单元水柱中藻类生物量估算模型

假定在水平剖面面积为单位面积、垂向水深为 D 米的单元水柱中, 藻类呈现水平均匀分布, 垂向上呈现高斯分布的状态, 则该单元水柱中藻类生物量 Q 可写成:

$$Q = \int_0^D c(z) dz = \int_0^D \left(\frac{c_{\max}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_{\max}}{\sigma}\right)^2\right] \right) dz, \quad (2)$$

式中, D 为垂向水深, m ; Q 为单元水柱藻类生物量, μg .

1.3 Hydrolight 辐射传输模型

Hydrolight 是基于《Light and Water》^[14] 编写的辐射传输模型. 它根据不同的输入数据和相应的算法模型来模拟所需要的水体辐射传输方程、各种水体光学参数以及光场分布等一系列的光学特

性^[14-15]. 本研究应用 Hydrolight 辐射传输模型, 选择适用于二类水体四组分 ABCASE2 模型(即纯水、藻类颗粒物、有色可溶性有机物、非藻类颗粒物), 模型需要对各水体组分固有光学参数如各组分的单位吸收、单位散射系数、散射相函数以及浓度进行设定, 对环境因子(水—气界面状况、天空状况、底质边界条件等)进行量化设定. 利用该模型, 通过输入不同的藻类垂向分布, 模拟得到相应的表观光学参数值, 研究不同藻类垂向分布结构对叶绿素 a 反演算法的影响, 并进一步讨论分析不同的藻类垂向分布结构对水体表观光学属性的影响.

1.4 研究方案

根据太湖多年野外采样数据^[16], 其叶绿素 a 浓度值大致为 $0.13 \sim 108.9 \mu\text{g/L}$, 参照此浓度范围, 设定一系列叶绿素 a 浓度梯度值, 以藻类垂向分布均匀、水深 2 m 为假定条件, 得到单元水柱藻类生物量 Q , 在单元水柱藻类生物量 Q 一定的条件下, 以太湖平均水深 2 m 为参照, 设定 $Z_{\max} = 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ m}$; $\sigma = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2 \text{ m}$, 利用单元水柱藻类生物量估算模型, 求出 C_{\max} , 进而得到不同的藻类垂向分布. 图 1 是单元水柱藻类生物量 $Q = 50 \mu\text{g}$, 改变 σ 和 Z_{\max} , 得到不同的藻类垂向分布曲线. 由图 1(a) 看出, 在 Z_{\max} 相对固定情况下, 随着 σ 的增大, 不同垂向分布之间的差异逐渐减小, $\sigma < 0.5 \text{ m}$ 是藻类垂向分布变化较显著的范围; 由图 1(b) 发现, σ 固定, 藻类浓度极大值深度 Z_{\max} 变化时, 藻类垂向分布曲线变化明显, 且与垂向均匀分布曲线有明显差异. 基于此分析, 在控制

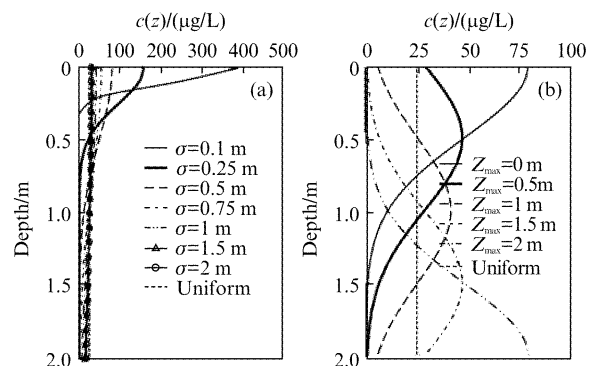


图 1 不同的藻类垂向分布结构 (a) $Q = 50 \mu\text{g}$, $Z_{\max} = 0 \text{ m}$, $\sigma = 0.1 \sim 2 \text{ m}$; (b) $Q = 50 \mu\text{g}$, $\sigma = 0.5 \text{ m}$, $Z_{\max} = 0 \sim 2 \text{ m}$

Fig. 1 Different algae vertical profiles. (a) $Q = 50 \mu\text{g}$, $Z_{\max} = 0 \text{ m}$, $\sigma = 0.1 \sim 2 \text{ m}$; (b) $Q = 50 \mu\text{g}$, $\sigma = 0.5 \text{ m}$, $Z_{\max} = 0 \sim 2 \text{ m}$

单元水柱藻类生物量 $Q = 10、20、30、40、50、70、100 \mu\text{g}$ 情况下, 设定 $\sigma = 0.1、0.25、0.5 \text{ m}$; $Z_{\text{max}} = 0、0.5、1.0、1.5、2.0 \text{ m}$, 利用 $Q、\sigma$ 以及 Z_{max} 的不同组合构建不同的藻类垂向分布结构, 具体参数设定见表 1. Hydrolight 模型中, 根据表 1 计算结果, 输入随水深变化的藻类浓度、非藻类颗粒物以及有色可溶性有机物, CDOM 的输入值参照太湖多年野外采样数据, 选取其平均值, 分别设定为 27.7 mg/L 以及 0.9 m^{-1} (CDOM 浓度以 440 nm 处其吸收系数表征)^[16]. 固有光学参数以及环境因子的输入参照李云梅等研究^[17], 设定太阳天顶角 30° , 天空无云, 模拟深度从水表面至水下 2 m , 间隔 0.5 m , 模拟得到 $400 \sim 800 \text{ nm}$ 波段范围内水体的表观光学量.

表 1 藻类垂向分布模拟方案

Table 1 Parameters of different algae vertical profiles

单元水柱藻类 生物量 $Q/\mu\text{g}$	藻类垂向均一分布时 的浓度值/ $(\mu\text{g/L})$	藻类垂向不均一分布	
		Z_{max}/m	σ/m
10	5	0	0.1
20	10	0.5	0.25
30	15	1.0	0.5
40	20	1.5	
50	25	2.0	
70	35		
100	50		

波段比值^[18-20]、三波段法^[21-23]是目前内陆湖泊常用的叶绿素 a 反演算法, 许多学者针对太湖建立的三波段反演模型是利用 800 nm 之后的反射比数据^[16,25], 超出 hydrolight 模拟的波段范围, 与三波段法相比, 波段比值法更简单易行, 因此本文选择波段比值法研究藻类垂向分布对其反演算法的影响. 马荣华等^[20,24]和张运林等^[26]基于实测光谱数据, 找出指示叶绿素浓度的重要敏感波段, 优化波段组合, 与叶绿素浓度进行相关性分析, 研究发现 706 nm 附近的反射峰与 682 nm 附近的吸收谷的反射率之比 R_{706}/R_{682} 与叶绿素浓度具有极强的相关性, 且对于太湖这类典型的二类水体, 其吸收曲线在 682 nm 和 706 nm 受悬浮物和 CDOM 的干扰很小, 比值法又可以去除相同因素的共同影响, 因此选择 R_{706}/R_{682} 波段比值反演算法. 应用到卫星遥感反演中, 该波段比值的波长取值恰好对应于 MERIS 遥感影像的 8、9 波段 (中心波长 $\text{nm}/$ 带宽 nm : $681/8、709/10$), 且基于 MERIS 影像的波段比值 R_{709}/R_{681} 反演叶绿素浓度的精度较高^[18]. 选取波段比值 R_{709}/R_{681} , 建立其

与垂向均一分布时叶绿素浓度的相关关系, $R^2 = 0.9964$, 表明基于该波段比值可以高精度反演垂向均一分布时的叶绿素 a 浓度.

2 结果分析

藻类垂向分布不均一条件下, R_{709}/R_{681} 波段比值与水体表层不同深度处叶绿素 a 浓度间呈现的相关性不尽相同 (见图 2), 受藻类垂向分布特征的影响, 该比值与藻类生物量间不存在一一对应的关系. 图 2(a) ~ 2(e) 显示了不同的垂向不均一分布条件下, 固定单元水柱藻类生物量, 波段比值与不同水深处叶绿素 a 浓度间的相关性, 排除图 2(b) 中 $Z_{\text{max}} = 0 \text{ m}$ 、 $\sigma = 0.1 \text{ m}$ 的数据 (即藻类分布集中于水面的情况), 独立于不同的藻类生物量以及不同的垂向分布结构, 波段比值与 0.25 m 水深处叶绿素 a 浓度间相关性显著. 图 2(f) ~ 2(i) 给出了波段比值与不同水深范围内平均叶绿素 a 浓度间的相关性, 除去图 2(g) 中 $Z_{\text{max}} = 0.5 \text{ m}$ 、 $\sigma = 0.1 \text{ m}$ (即藻类分布集中于 0.5 m 水深处的几个点), 波段比值与 $0 \sim 0.25 \text{ m}$ 、 $0 \sim 0.5 \text{ m}$ 范围内的平均叶绿素 a 浓度之间的相关性显著, 且平均浓度的深度范围越大, 相关性越不显著, 说明深层的藻类对水体表面的遥感反射比的影响有限. 因此, 可以利用该波段比值算法反演得到水深 0.25 m 处的叶绿素 a 的浓度或者表层 $0 \sim 0.25 \text{ m}$ 或 $0 \sim 0.5 \text{ m}$ 水深范围内的平均叶绿素 a 浓度.

在图 2(b)、2(f)、2(g) 的基础上, 增加藻类垂向分布均一时的结果, 得到不同垂向分布结构下, 固定单元水柱藻类生物量, R_{709}/R_{681} 波段比值与 0.25 m 处叶绿素 a 浓度、表层 $0 \sim 0.25 \text{ m}$ 、 $0 \sim 0.5 \text{ m}$ 水深范围内平均叶绿素 a 浓度间的相关性, 见图 3, 其中粗线标记代表了垂向分布均一、单元水柱不同藻类生物量的条件下, 波段比值与水深 0.25 m 处叶绿素 a 浓度以及 $0 \sim 0.25 \text{ m}$ 、 $0 \sim 0.5 \text{ m}$ 范围内平均叶绿素 a 浓度的关系. 可以看出, 除去 $Z_{\text{max}} = 0.5 \text{ m}$ 、 $\sigma = 0.1 \text{ m}$ 条件下的点, 对于不同的藻类生物量, 垂向不均一分布条件下构建的叶绿素 a 反演算法同样适用于藻类垂向均一分布情况. 结合前面的分析, 排除藻类分布集中于水面以及水下 0.5 m 处的情况, 波段比值法与水体表层 0.25 m 水深处叶绿素 a 浓度以及 $0 \sim 0.25 \text{ m}$ 、 $0 \sim 0.5 \text{ m}$ 水深范围内平均叶绿素 a 浓度之间具有独立于藻类生物量以及藻类垂向分布结构的相关性.

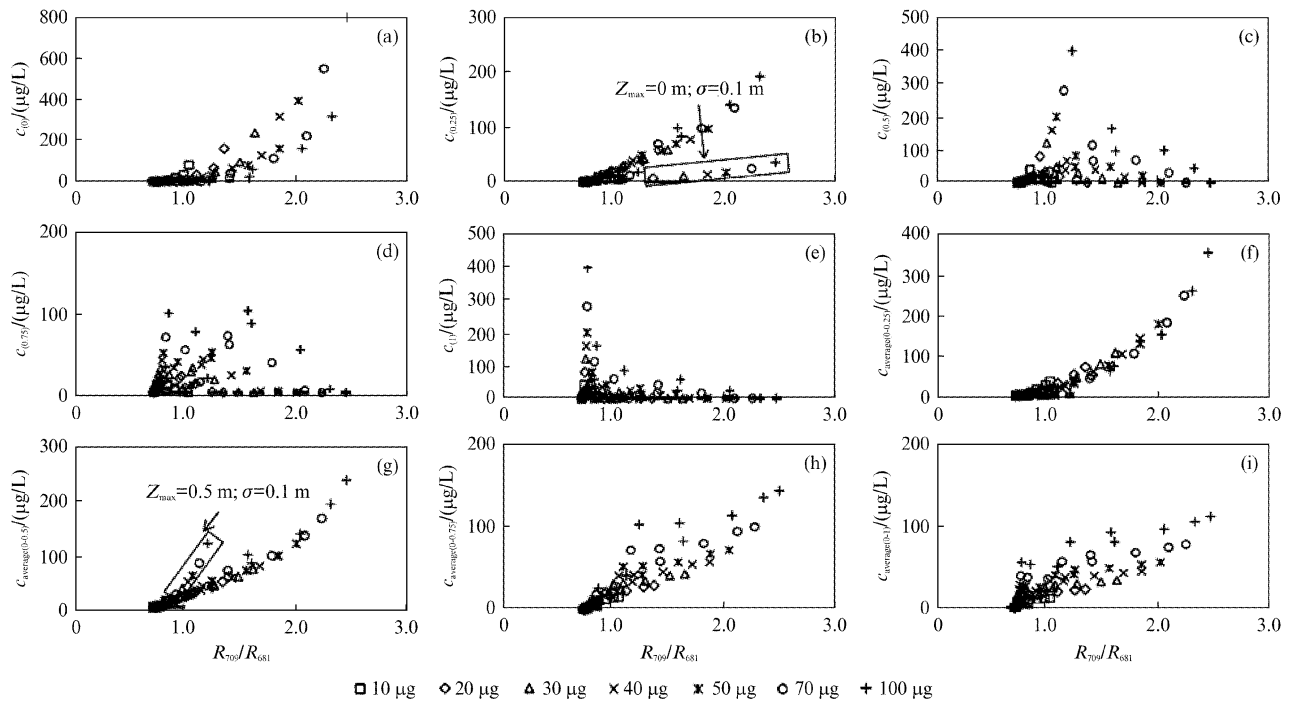


图2 藻类垂向不均匀分布(Q 、 σ 以及 Z_{\max} 的不同组合)条件下,波段比值与表层 0 m、0.25 m、0.5 m、0.75 m、1 m 水深处叶绿素 a 浓度(即 $c_{(0)}$ 、 $c_{(0.25)}$ 、 $c_{(0.5)}$ 、 $c_{(0.75)}$ 、 $c_{(1)}$) 以及与 0~0.25 m、0~0.5 m、0~0.75 m、0~1 m 水深范围平均叶绿素 a 浓度(即 $c_{\text{average}(0-0.25)}$ 、 $c_{\text{average}(0-0.5)}$ 、 $c_{\text{average}(0-0.75)}$ 、 $c_{\text{average}(0-1)}$) 间的关系

Fig. 2 Relationship of band ratio and chlorophyll-a concentration at different water depth considering different algae vertical profiles

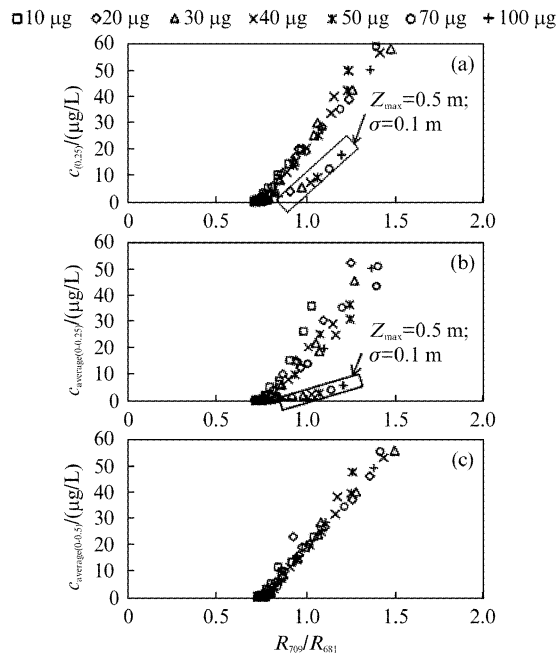


图3 不同垂向分布条件下,波段比值与表层 0.25 m 处叶绿素 a 浓度以及 0~0.25 m、0~0.5 m 水深范围平均叶绿素 a 浓度间的关系(粗线标记代表了垂向均一分布条件下不同的藻类生物量条件)

Fig. 3 Relationship of band ratio and chlorophyll-a concentration at 0.25 m or averaged chlorophyll-a concentration at 0~0.25/0~0.5 m considering different algae vertical profiles

基于以上分析,传统的波段比值法与垂向单元水柱中的藻类生物量之间不存在一一对应的关系,说明无法根据波段比值法反演结果直接得到整个垂向水柱中的藻类生物量,只有在已知藻类垂向分布结构的情况下,才可实现利用卫星遥感数据反演得到整个垂向单元水柱中的藻类生物量。

3 讨论

3.1 藻类垂向分布结构对水面叶绿素 a 浓度反演模型的影响

目前,反演叶绿素 a 浓度的模型基本上是基于遥感反射比与水面叶绿素 a 浓度的相关关系构建的,反演模型的研究大多是基于水体固有光学特性和光学有效组分垂向分布均一这一假设展开的,忽视了不同的垂向分布对表层叶绿素 a 浓度反演模型精确性的影响,本研究基于此,定量分析不同垂向分布结构对水面叶绿素 a 浓度反演模型的影响,见图 4。

研究中采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和相对误差(Relative Error, RE)对其精度进行评判。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (d_{p,i} - d_{m,i})^2}{n}}, \quad (3)$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|d_{p,i} - d_{m,i}|}{d_{m,i}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $d_{p,i}$ 和 $d_{m,i}$ 分别表示第 i 个高斯模型得到的叶绿素 a 浓度值和波段比值法得到的反演值, n 表示数据总数. 当叶绿素 a 浓度值小于 $1 \mu\text{g/L}$ 时, 由于 $d_{p,i}$ 和 $d_{m,i}$ 之间数量级的差异较大, 会造成相对误差 RE 过大, 因此, RE 的计算中排除叶绿素 a 浓度值小于 $1 \mu\text{g/L}$ 的情况.

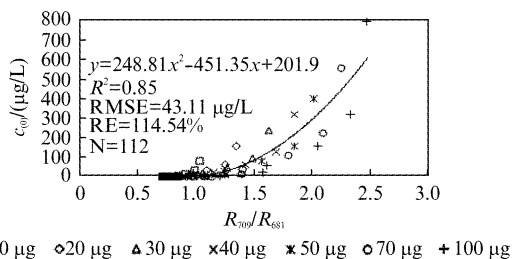


图4 不同垂向分布条件下, 波段比值与水面叶绿素 a 浓度间的相关性

Fig. 4 Relationship of band ratio and chlorophyll-a concentration at water surface considering different algae vertical profiles

与垂向均一时表层叶绿素 a 浓度与波段比值的相关系数 $R^2 = 0.9964$ 相比, 垂向分布不均一条件下的相关性 R^2 降为 0.85, 均方根误差 RMSE 由 $0.86 \mu\text{g/L}$ 增大为 $43.11 \mu\text{g/L}$, 相对误差 RE 由 5.85% 增加到 114.54%. 可见, 忽略藻类垂向分布会严重影响水体表面叶绿素 a 浓度的反演精度.

在第 2 部分定性分析的基础上, 排除藻类分布集中于水面以及水下 0.5 m 处的情况, 对波段比值法与水体表层 0.25 m 水深处叶绿素 a 浓度以及 0 ~ 0.25 m、0 ~ 0.5 m 水深范围内平均叶绿素 a 浓度值之间的相关性做进一步的定量研究, 见图 5.

与图 4 相比, 波段比值与 0.25 m 水深处叶绿素 a 浓度以及 0 ~ 0.25 m、0 ~ 0.5 m 水深范围内平均叶绿素 a 浓度值之间的相关性显著提高, R^2 由 0.85 增大到 0.99、0.98, RMSE 由 $43.11 \mu\text{g/L}$ 下降为 $4.23 \mu\text{g/L}$ 、 $8.25 \mu\text{g/L}$ 和 $5.25 \mu\text{g/L}$, RE 则由 114.54% 减小到 28.44%、23.44% 以及 19.10%. 可见, 利用波段比值法能较精确地反演水体表层 0.25 m 处叶绿素 a 浓度以及 0 ~ 0.25 m、0 ~ 0.5 m 水深范围平均叶绿素 a 浓度, 波段比值法与水体表层 0.25 m 水深处叶绿素 a 浓度以及 0 ~ 0.25 m、0 ~ 0.5 m 水深范围内平均叶绿素 a 浓度值之间具有独立于藻类生物量以及藻类垂向分布结构的相关性, 因此, 可以利用传统的波段比值法构建 0.25 m 水深

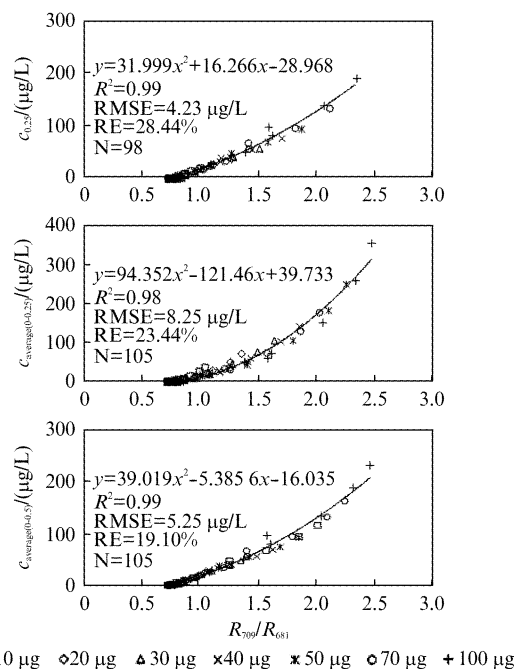


图5 不同垂向分布条件下, 波段比值与表层 0.25 m 处叶绿素 a 浓度以及 0 ~ 0.25 m、0 ~ 0.5 m 水深范围平均叶绿素 a 浓度间的定量关系

Fig. 5 Quantitative analysis on relationship of band ratio and chlorophyll-a concentration at 0.25 m or averaged chlorophyll-a concentration at 0 ~ 0.25 / 0 ~ 0.5 m

处叶绿素 a 浓度以及 0 ~ 0.25 m、0 ~ 0.5 m 水深范围内平均叶绿素 a 浓度值反演模型. 在利用野外实测叶绿素 a 浓度与反射光谱数据构建叶绿素 a 浓度反演模型时, 水样采集可以选择水下 0.25 m 水深处水样或者 0 ~ 0.25 m、0 ~ 0.5 m 水深范围的混合样.

3.2 藻类垂向分布结构对水体表观光学属性的影响

传统的叶绿素浓度反演模型主要是通过建立反射光谱特征与水体光学特性的关系, 进而定量获取叶绿素的含量与分布^[27-28]. 不同的藻类垂向分布结构在影响水体水色要素垂向分布的同时, 导致水体吸收、散射等固有光学量发生改变, 进而影响水体遥感反射比等表观光学属性, 最终对叶绿素反演模型的普适性和反演精度产生影响^[8].

在表 1 模拟方案的基础上, 增加垂向均一分布时单元水柱藻类生物量 $Q = 150、200、300、400、600 \mu\text{g}$ 以及垂向不均一分布时 $\sigma = 0.75、1.0、1.5、2.0 \text{ m}$ 的模拟方案, 分析垂向均一分布条件下藻类生物量从低到高变化以及不同的垂向不均一分布结构对于水体表观光学属性的影响规律, 见图 6. 图 6 (a₁) ~ (a₃) 给出了藻类垂向分布均一时, 水体表观光学属性 (遥感反射比 R_{rs} 、离水辐亮度 L_w 、下行辐射漫衰减系数 K_d) 随藻类生物量的变化. 在 400 ~

500 nm 波段范围内,由于藻类色素及有色可溶性有机物的强烈吸收,水体反射率较低,540 ~ 580 nm 范围内,叶绿素和胡萝卜素的弱吸收以及细胞的散射作用形成反射峰,620 ~ 640 nm,因为藻蓝素藻青蛋白的吸收,反射率较低,在 700 nm 附近的反射峰则是由于叶绿素的吸收系数极低形成的,该反射峰的出现是含藻类水体最显著的光谱特性^[29,17]. 图 6 (a₃)表明,当藻类生物量小于 300 μg 时,在 400 ~ 550 nm 波段范围内,受藻类和非藻类颗粒物的强吸收作用,下行辐射漫衰减系数 K_d 随波长增加逐渐减小,之后变化平缓,直到 710 nm 附近又开始平缓增加,受叶绿素在 670 nm 附近选择性吸收影响, K_d 在

此处出现衰减峰值^[30]. 而当藻类生物量大于 300 μg 时,受藻类色素吸收光谱影响, K_d 在 440 nm 和 680 nm 处均出现明显衰减峰值,且浓度越高,峰值越大,并且在此高浓度情况下,藻蓝蛋白在 600 ~ 640 nm 处的衰减带能更加明显显示出来^[17]. 随着藻类生物量的逐渐增大,在 400 ~ 700 nm 范围内,遥感反射比 R_{rs} 与离水辐亮度 L_w 不断减小,下行辐射漫衰减系数 K_d 不断增大,但在 700 ~ 800 nm 的红光和近红外波段范围,当藻类生物量小于 300 μg 时,藻类生物量的变化对 R_{rs} 、 L_w 以及 K_d 的影响很小,基本上可以忽略不计,而在藻类生物量大于 300 μg 的条件下,会引起 R_{rs} 、 L_w 的明显抬升.

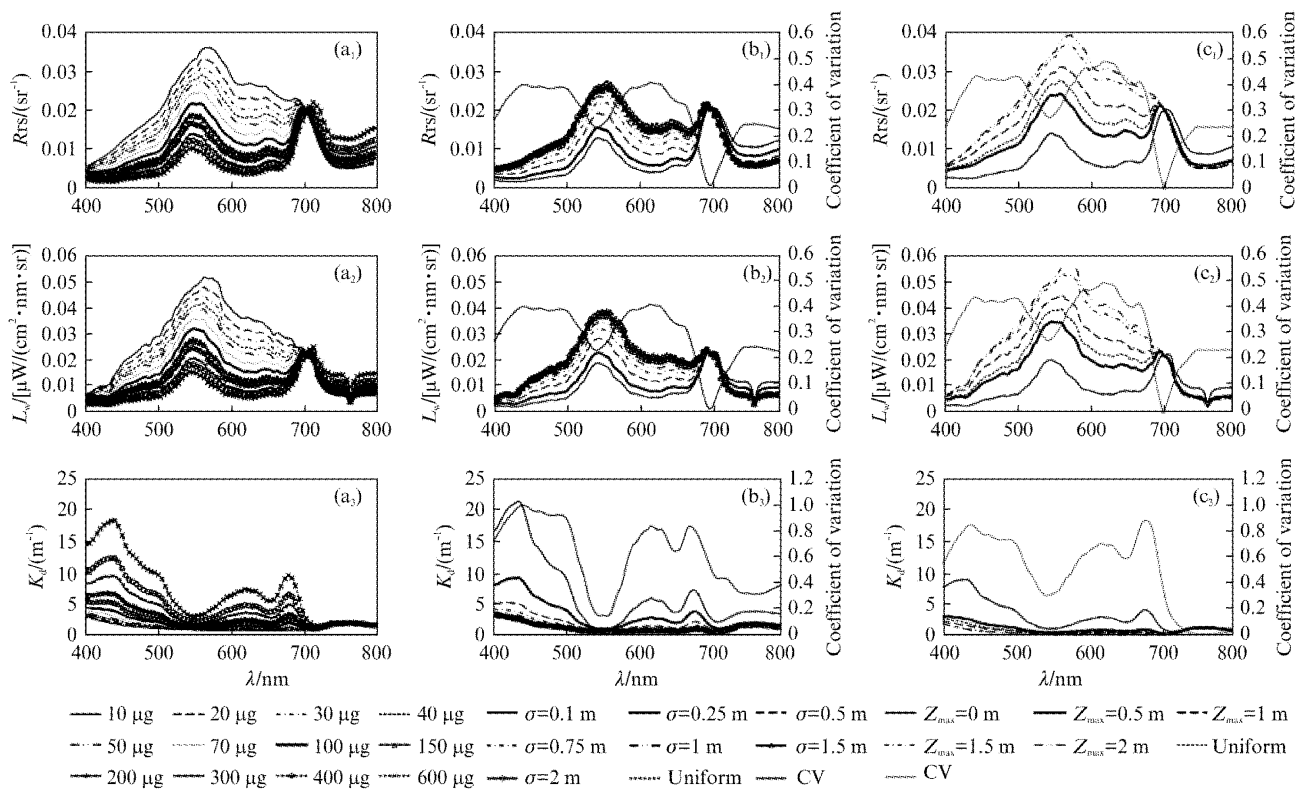


图 6 不同的藻类垂向分布结构对水体表观光学属性(遥感反射比 R_{rs} 、离水辐亮度 L_w 、漫衰减系数 K_d)的影响。(a₁) ~ (a₃): 藻类垂向分布均一下,不同的藻类生物量对表观光学属性的影响;(b₁) ~ (b₃): 固定藻类生物量 $Q = 50 \mu\text{g}$ 、极大值深度 $Z_{\text{max}} = 0 \text{ m}$, σ 变化时,不同藻类垂向分布对表观光学属性的影响;(c₁) ~ (c₃): 固定藻类生物量 $Q = 50 \mu\text{g}$ 、标准偏差 $\sigma = 0.5 \text{ m}$, Z_{max} 变化时,不同藻类垂向分布对表观光学属性的影响

Fig. 6 Influence of different algae profiles on the apparent optical properties (AOPs) (remote-sensing reflectance R_{rs} , water leaving radiance L_w , diffuse attenuation coefficients of downwelling irradiance K_d). (a₁) ~ (a₃), the influence of different algae biomass on AOPs with uniform algae vertical profiles; (b₁) ~ (b₃): when algae biomass of unit water column $Q = 50 \mu\text{g}$ and the depth of chlorophyll-a maximum $Z_{\text{max}} = 0 \text{ m}$, the influence of different algae profiles on AOPs with the variations of σ ; (c₁) ~ (c₃), when algae biomass of unit water column $Q = 50 \mu\text{g}$ and the standard deviation $\sigma = 0.5 \text{ m}$, the influence of different algae profiles on AOPs with the variations of Z_{max}

图 6 (b₁) ~ (c₃) 为单元水柱藻类生物量 $Q = 50 \mu\text{g}$ 时,不同的垂向分布对于水体表观光学属性(遥感反射比 R_{rs} 、离水辐亮度 L_w 、下行辐射漫衰减

系数 K_d) 的影响。从图中可以看出,400 ~ 700 nm 范围是变异系数较大区域,在此范围,水体表观光学属性受不同的藻类垂向分布的影响明显,与垂向均一

分布相比,藻类分布越集中于水面(即 σ 、 Z_{\max} 越小),其对表观光学属性的影响越大;而在700~800 nm范围内,当 σ 小于0.5 m或者 Z_{\max} 小于0.5 m,即藻类分布集中且极大值分布在接近水体表面的范围内时,会引起 R_{rs} 、 L_w 以及 K_d 在此红光和近红外波段范围内的明显抬升,导致变异系数增大,而其它条件下不同垂向分布对这三个表观光学参数的影响不显著,基本上可以忽略不计。

4 结论

基于高斯模型和hydrolight辐射传输模型研究了藻类垂向分布结构对太湖叶绿素a浓度典型反演算法的影响规律,通过分析可知:

(1)决定藻类浓度极大值深度的参数 Z_{\max} 对藻类垂向分布结构的变化影响显著;决定极大值宽度的参数 σ 越大,不同垂向分布间的差异越小, $\sigma < 0.5$ m是藻类垂向分布变化敏感的范围; $Z_{\max} = 0$ m、 $\sigma = 0.1$ m或者 $Z_{\max} = 0.5$ m、 $\sigma = 0.1$ m(即藻类分布集中于水面以及水下0.5 m处的情况)会严重干扰叶绿素a波段比值反演算法的精确性。

(2)排除藻类分布集中于水面以及水下0.5 m的情况,传统的波段比值法与水体表层0.25 m处叶绿素a浓度、0~0.25 m、0~0.5 m水深范围内平均叶绿素a浓度值之间具有独立于藻类生物量以及藻类垂向分布结构的相关性。

(3)由于藻类垂向分布不均一性,导致基于水体表面遥感反射比的波段比值反演结果与单元水柱内的藻类生物总量间不存在一一对应的关系。

5 展望

(1)本研究仅仅是利用高斯模型与Hydrolight辐射传输模型模拟得到的藻类垂向分布结构以及相应的光学参数值进行研究,需要野外试验数据的验证。

(2)水文气象因子等外环境因子对藻类垂向分布起关键性作用,因此野外观测数据的获取对于外环境因子与藻类垂向分布结构间关系的研究必不可少。

(3)利用模拟结果分析藻类垂向分布变化对叶绿素反演算法的影响时,为方便研究,非藻类颗粒物以及有色可溶性有机物CDOM都设定为固定值,对太湖等富营养化湖泊而言,水体光学特性复杂多变,高浓度的非藻类颗粒物、CDOM以及其垂向分布结构对叶绿素反演模型精度的影响有待进一步研究。

致谢

数据源来自湖泊一流域科学数据共享平台(<http://lake.geodata.cn>),在此表示感谢。

References

- [1] GAO Yue-Xiang, ZHANG Yong-Chun. Influences of hydrometeorologic factor on algae bloom [J]. *Water Sciences and Engineering Technology* (高月香,张永春.水文气象因子对藻华爆发的影响.水科学与工程), 2006, 2: 10-11.
- [2] Moreno-Ostos E, Cruz-Pizarro L, Basanta A, et al. The influence of wind-induced mixing on the vertical distribution of buoyant and sinking phytoplankton species [J]. *Aquatic Ecology*. 2009, 43(2): 271-284.
- [3] Webster I T, Hutchinson P A. Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in lakes revisited [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39(2): 365-373.
- [4] ZHU Yong-Chun, CAI Qi-Ming. The dynamic research of the influence of wind field on the migration of algae in Taihu Lake [J]. *Journal of Lake Sciences* (朱永春,蔡启铭.风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究.湖泊科学), 1997, 9(2): 152-158.
- [5] MA Rong-Hua, KONG Fan-Xiang, DUAN Hong-Tao, et al. Spatio-temporal distribution of cyanobacteria blooms based on satellite imageries in Lake Taihu, China [J]. *Journal of Lake Sciences* (马荣华,孔繁翔,段洪涛,等.基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识.湖泊科学), 2008, 20(6): 687-694.
- [6] KONG Fan-Xiang, MA Rong-Hua, GAO Jun-Feng, et al. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences* (孔繁翔,马荣华,高俊峰,等.太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践.湖泊科学), 2009, 21(3): 314-328.
- [7] MA Rong-Hua, TANG Jun-Wu, DUAN Hong-Tao, et al. Progress in lake water color remote sensing [J]. *Journal of Lake Sciences* (马荣华,唐军武,段洪涛,等.湖泊水色遥感研究进展.湖泊科学), 2009, 21(2): 143-158.
- [8] HUANG Chang-Chun, LI Yun-Mei, WANG Qiao, et al. Influence of vertical distribution of water constituent on the remote sensing based on hydrodynamics [J]. *Acta Optica Sinica* (黄昌春,李云梅,王桥,等.基于水动力的水体组分垂直结构对遥感信号的影响.光学学报), 2012, 32(2): 29-38.
- [9] CAO Wen-Xi. Influence of vertical chlorophyll structure on water-leaving radiance [J]. *Marine Science Bulletin* (曹文熙.叶绿素垂直分布结构对离水辐亮度光谱特性的影响.海洋通报), 2000, 19(3): 30-37.
- [10] Stramska M, Stramski D. Effects of a nonuniform vertical profile of chlorophyll concentration on remote-sensing reflectance of the ocean [J]. *Applied Optics*. 2005, 44(9): 1735-1747.
- [11] Lewis M R, Cullen J J, Platt T. Phytoplankton and thermal structure of the upper ocean; consequences of non-uniformity in the chlorophyll profile [J]. *Journal of Geophysical Research*. 1983, 88(C4): 2565-2570.
- [12] Platt T, Sathyendranath S, Caverhill C, et al. Ocean primary production and available light; further algorithms for

- remote sensing [J]. *Deep sea research*. 1988, **35** (6): 855-879.
- [13] XI Ying, DU Ke-Ping, ZHANG Li-Hua, *et al.* The influence of nonuniform vertical profiles of chlorophyll concentration on apparent optical properties [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (席颖, 杜克平, 张丽华, 等. 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*), 2010, **30** (2): 489-494.
- [14] Mobley C D. *Light and Water: Radiative transfer in natural waters* [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [15] Mobley C D, Sundman L K. *Hydrolight-ecolight 5 users' guide* [R]. Sequoia Scientific, Inc. Bellevue, WA: 2008.
- [16] Duan H T, Ma R H, Zhang Y Z, *et al.* A new three-band algorithm for estimating chlorophyll concentrations in turbid inland lakes [J]. *Environmental Research Letters*. 2010, **5** (4): 1-6.
- [17] LI Yun-Mei, WANG Qiao, HUANG Jia-Zhu, *et al.* The water optical properties and water color remote sensing in Lake Taihu [M]. Beijing: Science Press (李云梅, 王桥, 黄家柱, 等. 太湖水体光学特性及水色遥感. 北京: 科学出版社), 2010.
- [18] LI Yun-Liang, ZHANG Yun-Lin, LI Jun-Sheng, *et al.* Comparison of chlorophyll a concentration estimation in Taihu Lake using different methods [J]. *Environmental Science* (李云亮, 张运林, 李俊生, 等. 不同方法估算太湖叶绿素 a 浓度对比研究. *环境科学*), 2009, **30** (3): 680-686.
- [19] Hoogenboom H J, Dekker A G, Althuis J A. Simulation of AVIRIS sensitivity for detecting chlorophyll over coastal and inland waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **65** (3): 333-340.
- [20] MA Rong-Hua, DAI Jin-Fang. Quantitative estimation of chlorophyll-a and total suspended matter concentration with Landsat ETM based on field spectral features of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences* (马荣华, 戴锦芳. 结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量. *湖泊科学*), 2005, **17** (2): 97-103.
- [21] YANG Yu, LI Yun-Mei, WANG Qiao, *et al.* Retrieval of chlorophyll-a concentration in the turbid and eutrophic Taihu Lake [J]. *Journal of Geo-Information Science* (杨煜, 李云梅, 王桥, 等. 富营养化的太湖水体叶绿素 a 浓度模型反演. *地球信息科学学报*), 2009, **11** (5): 597-602.
- [22] LE Cheng-Feng, LI Yun-Mei, SUN De-Yong, *et al.* Spatio-temporal distribution of chlorophyll a concentration and its estimation in Taihu Lake [J]. *Environmental Science* (乐成峰, 李云梅, 孙德勇, 等. 太湖叶绿素 a 浓度时空分异及其定量反演. *环境科学*), 2008, **29** (3): 619-625.
- [23] LI Fang, XU Jing-Ping, MA Rong-Hua, *et al.* Chlorophyll-a retrieval in inland waters based on a regional three-band model [J]. *Journal of Remote Sensing* (李方, 徐京萍, 马荣华, 等. 内陆水体叶绿素 a 浓度反演的区域化三波段模型研究. *遥感学报*), 2011, **15** (6): 1156-1170.
- [24] MA Rong-Hua, DAI Jin-Fang. Chlorophyll-a concentration estimation with field spectra of water-body near Meiliang bayou in Taihu lake [J]. *Journal of Remote Sensing* (马荣华, 戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度. *遥感学报*), 2005, **9** (1): 78-86.
- [25] DU Cong, WANG Shi-Xin, ZHOU Yi, *et al.* Remote chlorophyll a retrieval in Taihu Lake by three-band model using hyperion hyperspectral data [J]. *Environmental Science* (杜聪, 王世新, 周艺, 等. 利用 Hyperion 高光谱数据的三波段法反演太湖叶绿素 a 浓度. *环境科学*), 2009, **30** (10): 2904-2910.
- [26] ZHANG Yun-Lin, QIN Bo-Qiang. Quantitative retrieval of phytoplankton pigment based on water inherent optical properties in lake Taihu [J]. *Environmental Science* (张运林, 秦伯强. 基于水体固有光学特性的太湖浮游植物色素的定量反演. *环境科学*), 2006, **27** (12): 2439-2444.
- [27] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al.* A semianalytic radiance model of ocean color [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, **93** (D9): 10909-10924.
- [28] HAN Xiu-Zhen, ZHENG Wei, LIU Cheng, *et al.* Estimation of chlorophyll-a using MERSI and MODIS images in Taihu Lake, China [J]. *Geographical Research* (韩秀珍, 郑伟, 刘诚, 等. 基于 MERSI 和 MODIS 的太湖水体叶绿素 a 含量反演. *地理研究*), 2011, **30** (2): 291-300.
- [29] MA Rong-Hua, DUAN Hong-Tao, TANG Jun-Wu, *et al.* Remote sensing of lake water environment [M]. Beijing: Science Press (马荣华, 段洪涛, 唐军武, 等. 湖泊水环境遥感. 北京: 科学出版社), 2010.
- [30] ZHANG Yun-Lin, QIN Bo-Qiang, CHEN Wei-Min, *et al.* Analysis on distribution and variation of beam attenuation coefficient of Taihu Lake's water [J]. *Advances in Water Science* (张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征. *水科学进展*), 2003, **14** (4): 447-453.