

# 悬浮颗粒物垂直分布对水体光学特性的影响\*

## Effects of Nonuniform Vertical Profile of Suspended Particulate Matter on Water Optical Properties

黄 珏<sup>1,3</sup>, 阳凡林<sup>1</sup>, 陈莉琼<sup>2</sup>, 陈晓玲<sup>2</sup>, 江 涛<sup>1\*\*</sup>

HUANG Jue<sup>1,3</sup>, YANG Fanlin<sup>1</sup>, CHEN Liqiong<sup>2</sup>, CHEN Xiaoling<sup>2</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东青岛 266590; 2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079; 3. 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室, 山东青岛 266590)

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong, 266590, China; 2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing (LIESMARS), Wuhan University, Wuhan, Hubei, 430079, China; 3. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Qingdao, Shandong, 266590, China)

**摘要:**【目的】研究典型湖泊水体垂直分布对遥感反射率的影响,并了解其主要影响波段和影响水深。【方法】利用实测数据和前向辐射传输模型得到水体垂直分布模拟数据,选取两种典型的湖泊水体垂直分布类型,研究它们对水表面遥感反射率的影响,并分析其敏感波长和最大影响深度。【结果】与均质水体相比,不同类型的水体垂直分布最大会引起遥感反射率 100% 的高估或者 30% 的低估且误差随着水深的增大而减小。当表层悬浮颗粒物浓度( $SPM_1$ )较小时,在相同浓度条件下,不同类型水体垂直分布的敏感波长随着水深增大逐渐减小;在同一深度时,敏感波长随着悬浮颗粒物浓度的增大逐渐向长波方向移动;当  $SPM_1$  较大时,敏感波长随水深增大没有明显变化。不同类型水体在  $SPM_1$  较低时,各波段的最大影响水深各不相同,可达 10 m,并随表层悬浮颗粒物浓度的增大而逐渐减小,峰值波长逐渐向长波方向移动;当  $SPM_1$  较大时,最大影响水深集中于 0.5~2.0 m,随波段递增无明显变化规律。随着表层水体的衰减系数的增大,最大影响水深在不同波段基本呈递减趋势。【结论】研究成果有助于准确的理解表层遥感反射率中所包含的水体垂直结构信息,并为深入研究非均质水体光学特性及其辐射传输过程提供理论依据。

**关键词:** 水体垂直分布 遥感反射率 敏感波长 最大影响水深

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2016)06-0507-06

收稿日期: 2016-07-27

作者简介: 黄 珏(1987-),女,博士,博士后,主要从事水环境定量遥感研究。

\* 山东省自然科学基金项目(ZR2016DB23),国家自然科学基金项目(41471331),海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室项目(2015B06)和青岛市博士后研究人员应用研究项目(2015206)资助。

\*\* 通信作者: 江 涛(1961-),男,博士,教授,主要从事资源与环境遥感、遥感数字图像处理等方面的研究, E-mail: tjia@126.com。

**Abstract:** 【Objective】 The influence exerted by nonuniform vertical profile of suspended particulate matter on remote-sensing reflectance was studied for a typical inland lake. The major sensitive wavelengths and maximum influence water depths were discussed. 【Methods】 The in situ data and forward radiative transfer model were applied to simulated two typical vertical distributions of water column. The sensitivity of remote sensing reflectance( $R_{rs}$ ) associated with stratified water column showed correlation with suspended particulate matter (SPM), sensitive wavelength and maximum influence water

depth. **【Results】** Compared to vertical uniformed water column, different vertically stratified types could cause more than 100% overestimation or 30% underestimation of  $R_{rs}$  at most and the error decreased with the increase of water depth. When the concentration of surface SPM ( $SPM_1$ ) was small, the sensitive wavelengths of different water profiles decreased with increasing water depth under the same  $SPM_1$ . For the same water depth, the sensitive wavelengths moved towards the longer wavebands with increasing  $SPM_1$ . When  $SPM_1$  was large, no obvious correlation between water depth and sensitive wavelength was observed. The maximum influence water depths for different vertical profiles varied and could reach up to 10 m when the water was clear. With the increased  $SPM_1$ , the maximum influence water depths decreased and sensitive wavelengths moved towards the longer wavebands. In contrast, the maximum influence water depths centered on 0.5~2.0 m and showed no pronounced tendency when the water was turbid. In addition, the increasing attenuation coefficient of surface water usually led to a decreasing maximum influence water depth. **【Conclusion】** The results will improve our understanding of the vertical structure information obtained from surface remote sensing reflectance. **Key words:** water vertical distribution, remote sensing reflectance, sensitive wave length, maximum influence water depth

## 0 引言

**【研究意义】** 现有的水色遥感研究大多基于水体组分均匀分布的假设<sup>[1-2]</sup>, 然而在地表径流、江水倒灌、风浪掀沙、采砂基建等因素的影响下, 自然水体在水平和垂直方向上通常呈现非均匀分布。因此, 准确地理解表层遥感反射率中所包含的水体垂直结构信息, 可以为深入研究非均质水体光学特性及其辐射传输过程提供理论依据。**【前人研究进展】** Gordon 等<sup>[3-5]</sup> 最早展开水体垂直不均匀分布对遥感反射率的影响研究。通过水体辐射传输的 Monte Carlo 方法对两层和连续多层海水进行模拟发现, 对透光层内水体组分浓度引入剖面权重函数可以将分层水体的漫反射比等效为带权重的均质水体的漫反射比, 并提出了与固有光学特性相关的权重函数表达式。Zaneveld 等<sup>[6]</sup> 基于双流模型提出了修正的剖面权重函数对 Gordon 公式进行了改进。对于大洋水体, 已有学者开始关注浮游植物主导水域次表层叶绿素最大值引起的水体垂直不均匀分布对透光层深度、水表面以上遥感反射率和叶绿素剖面权重函数的影响。研究发现, 叶绿素垂直均匀分布和不均匀分布所产生的遥感反射率差异在 5%~70% 之间<sup>[7-9]</sup>。而内陆湖泊水体的相关研究相对较少<sup>[10]</sup>。**【本研究切入点】** 对于湖泊而言, 河流携沙入湖、江水倒灌、湖泊环流和采砂等影响是引起泥沙输移、沉积、再悬浮的主要原因, 而因此产生的不同类型的悬浮颗粒物垂向分布差异对水体光学特性的影响仍有待研究。**【拟解决的关键问题】** 依据野外采样结果, 确定鄱阳湖水体悬浮颗粒物的典型垂直分布类型, 利用水体光学辐射传输模型, 模拟得到不同悬浮颗粒物垂直分布条件下的水体光学特性, 在定量分析不同类型水体垂直分布对遥感反

射率影响的基础上, 分析其敏感波长、最大影响深度。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区域概况

鄱阳湖位于长江中下游的江西省境内, 是我国最大的淡水湖泊(图 1)。鄱阳湖季节性水面积变化显著, 年内丰、枯水季湖泊面积变化 10 倍以上<sup>[11]</sup>; 水深在 1~25 m 之间, 平均水深为 8.4 m(文献<sup>[12]</sup>)。鄱阳湖的水量吞吐平衡受到五大河流及长江水资源调度的共同影响。自 2001 年兴起的大规模采砂运动引起了鄱阳湖底质再悬浮, 导致悬浮颗粒物浓度的增大和水体透明度的降低<sup>[13]</sup>, 还直接影响了鄱阳湖流域生态系统功能和可持续利用。

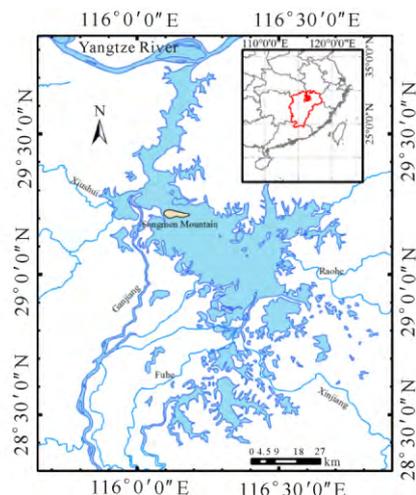


图 1 鄱阳湖位置图

Fig. 1 Location of Poyang Lake

### 1.2 数据测量

本研究中所用的实测数据来自 2008 年~2011 年期间的 3 次鄱阳湖水色观测实验, 主要的观测数据包括水面光谱数据、悬浮颗粒物浓度、黄色物质浓度、

水深、水体固有光学特性(吸收系数、衰减系数等)和辅助数据,具体测量步骤参见文献[14-15]。其中水体悬浮颗粒物浓度进行了垂直分层测量,在距水表面0.5 m处和距湖底0.5 m处分别采集表层和底层水样,在水深的一半处取中层水样,并分别计算各层水体的悬浮颗粒物浓度。依据鄱阳湖实测数据,本研究选择两种典型的湖泊水体悬浮颗粒物垂直分布类型:自表层至底层悬浮颗粒物浓度递增型(I型)和自表层至底层悬浮颗粒物浓度递减型(D型)。测量结果以表层悬浮颗粒物浓度为基准,做归一化处理。

### 1.3 辐射传输模拟

本研究利用 Hydrolight 软件进行辐射传输模拟<sup>[16]</sup>,水体组分主要考虑矿物质与岩屑以及黄色物质(CDOM),因此固有光学量参数化模型可以表示为

$$a(\lambda, z) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda, z) + a_g(\lambda, z), \quad (1)$$

$$b(\lambda, z) = b_w(\lambda) + b_p(\lambda, z), \quad (2)$$

其中  $a(\lambda, z)$  为水体总吸收系数,  $a_w(\lambda)$  为纯水吸收系数,  $a_p(\lambda, z)$  为悬浮颗粒物吸收系数,  $a_g(\lambda, z)$  为黄色物质吸收系数;  $b(\lambda, z)$  为水体总散射系数,  $b_w(\lambda)$  为纯水散射系数,  $b_p(\lambda, z)$  为悬浮颗粒物散射系数,黄色物质的散射系数忽略不计。模型假定  $a_w(\lambda)$  和  $b_w(\lambda)$  不随深度而变化,仅为波长的函数;而  $a_p(\lambda, z)$ 、 $b_p(\lambda, z)$  和  $a_g(\lambda, z)$  在垂直剖面上非均匀分布,为波长与水深的函数:

$$a_p(\lambda, z) = a_p^*(\lambda) \times \text{SPM}(z), \quad (3)$$

$$b_p(\lambda, z) = b_p^*(\lambda) \times \text{SPM}(z), \quad (4)$$

$$a_g(\lambda, z) = a_g(\lambda_0, z) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] = [0.070 \times \text{SPM}(z)^{0.64}] \exp[-S(\lambda - \lambda_0)], \quad (5)$$

其中  $\text{SPM}(z)$  为实测的悬浮颗粒物浓度垂直分布函数,  $z$  为水深,  $a_p^*(\lambda)$  和  $b_p^*(\lambda)$  分别为实测的悬浮颗粒

物质量比吸收系数和质量比散射系数。CDOM 吸收系数  $a_g(\lambda, z)$  的光谱斜率 ( $S = 0.0119$ ) 由实测数据拟合得到<sup>[2,17]</sup>。

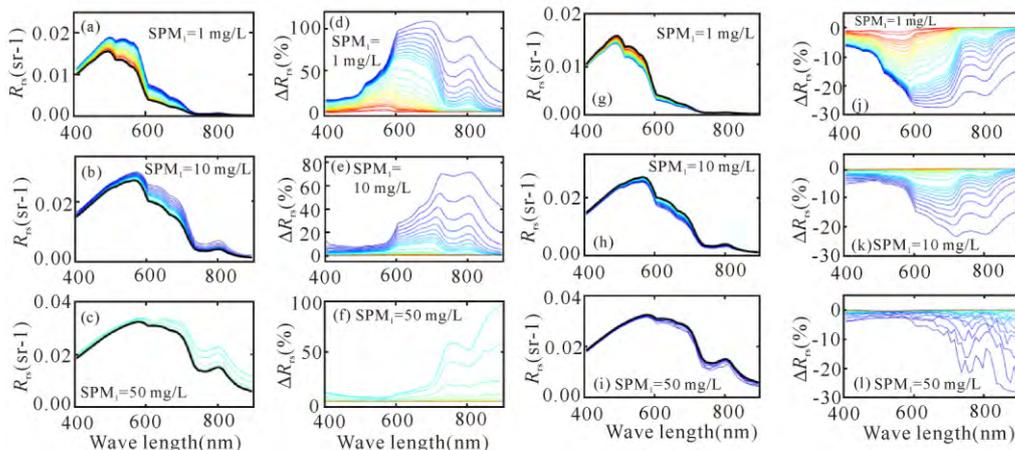
Hydrolight 模拟中,散射相函数选择 Fournier-Forand 模型,悬浮颗粒物的后向散射概率取 0.025,大气模式选择 Radtran 模型,平均风速 5 m/s,太阳高度角  $30^\circ$ ,水深为无限深<sup>[14]</sup>。输出波长范围设置为 300~900 nm,间隔 10 nm。表层悬浮颗粒物浓度 ( $\text{SPM}_1$ ) 在 0.5~50.0 mg/L 之间变化。由于水体深度也会对水下光场产生影响,因此本研究依据鄱阳湖实测数据设置了 4 个水深区间:0.1~1.0 m(增量 0.1 m),1.0~5.0 m(增量 0.5 m),5~10 m(增量 1 m),10~20 m(增量 5 m)。由于  $\text{SPM}_1$  较大时光线的穿透能力有限,因此不同  $\text{SPM}_1$  模拟的深度区间数量不同。此外,本研究模拟了  $\text{SPM}_1$  为 0.5~50.0 mg/L 的 9 组垂直均匀分布水体的光学特性,作为后续分析中非均质水体的参考标准。

## 2 结果与分析

### 2.1 垂直分布对遥感反射率的影响

图 2 为悬浮颗粒物浓度递增型水体垂直分布(I型)和递减型水体垂直分布(D型)的遥感反射率随水体深度的变化情况,图中黑色实线代表均质水体遥感反射率,图中彩线从蓝色至红色的变化方向为水深( $z$ )递增的方向。第 1,3 列为遥感反射率( $R_{rs}$ ),第 2,4 列为非均匀水体与均质水体之间遥感反射率的百分比误差( $\Delta R_{rs}$ )。

与均质水体相比, I 型水体垂直分布使  $R_{rs}$  在各个波段被高估,特别是当  $\text{SPM}_1$  较小且水深较浅时  $\Delta R_{rs}$  较大,而随着水深的增大,  $\Delta R_{rs}$  逐渐减小并趋近于 0。例如  $\text{SPM}_1$  为 1 mg/L 时,  $\Delta R_{rs}$  从 0.1 m 时的



(a)~(f) are type I, (g)~(l) are type D

图 2 水体垂直分布模拟结果

Fig. 2 Radiative transfer simulation results for vertical profile

+108.2%减小到 20 m 时的接近于 0(图 2d)。从整个光谱范围来看,随着悬浮颗粒物浓度的增大, I 型水体垂直分布下  $R_{rs}$  的主要影响波段范围逐渐向长波方向移动。如图 2a~c 所示,  $SPM_1 = 1 \text{ mg/L}$  时, 水体垂直分布的主要影响波段为 500~700 nm; 当  $SPM_1 = 10 \text{ mg/L}$  时, 主要影响波段为 650~800 nm; 当  $SPM_1 = 50 \text{ mg/L}$  时, 主要影响波段长于 700 nm, 且 400~700 nm 不同水深对应的  $\Delta R_{rs}$  无明显变化 ( $\leq 18\%$ )。D 型水体垂直分布使  $R_{rs}$  在各波段被低估, 最多可低估 30%左右(图 2l)。与 I 型相似, 随着水深的增大, 水体垂直分布对  $R_{rs}$  的影响逐渐减弱, 随着  $SPM_1$  的增大, 水体垂直分布的主要影响波段逐渐向红光波段移动。

## 2.2 敏感波长

在不同悬浮颗粒物浓度、不同水深条件下使得  $|\Delta R_{rs}(\lambda)|$  最大的波长, 可视为对于  $R_{rs}$  变化最为敏感的波长( $\lambda_{\max}$ )。如图 3 所示, 当悬浮颗粒物浓度较小时(例如  $\leq 20 \text{ mg/L}$ ), 两种水体垂直分布基本遵循相似的变化规律: 在相同浓度条件下,  $\lambda_{\max}$  随着水深的增加逐渐减小; 同一深度时,  $\lambda_{\max}$  随着  $SPM_1$  的增大逐渐向长波方向移动。由此可知, 对于水深在 1~10 m 并且  $SPM_1 \leq 20 \text{ mg/L}$  的非均质水体(适用于大部分内陆湖泊水体), 水体垂直分布的主要影响波段范围为 580~710 nm。因此, 在建立遥感反演模型时, 如能避开以上波段范围可以有效减小由于水体垂直不均匀分布所引起的遥感反射率误差。而当  $SPM_1$  较大时(例如 50 mg/L),  $\lambda_{\max}$  主要集中于 750~900 nm, 且随水深增大没有明显变化。

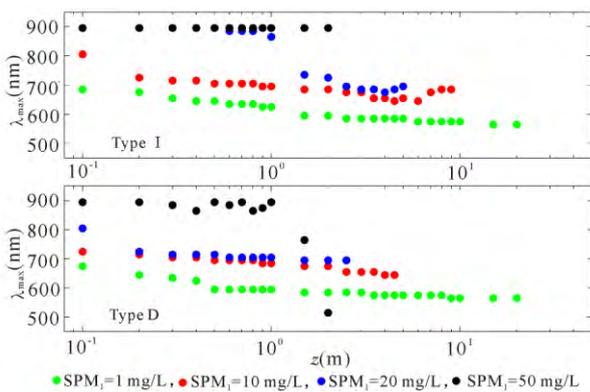


图 3 敏感波长与水深散点图

Fig. 3 Sensitive wavelength vs water depth

## 2.3 最大影响深度

依据 Stramska 等<sup>[6]</sup>的研究成果, 本研究选择 5% 作为判定  $\Delta R_{rs}$  明显变化的标准。由前文分析可知, I 型和 D 型水体垂直分布的  $\Delta R_{rs}$  随水深增大呈单调递减, 因此最大影响水深 ( $z_{\max}$ ) 应满足  $z \geq z_{\max}$

时,  $|\Delta R_{rs}(\lambda)| < 5\%$ ;  $z < z_{\max}$  时,  $|\Delta R_{rs}(\lambda)| \geq 5\%$ 。由图 4 可知, 对于较低浓度的 I 型和 D 型水体垂直分布, 各波段的最大影响深度各不相同, 最大影响水深可达 10 m ( $SPM_1 = 1 \text{ mg/L}$ ), 并且随着表层悬浮颗粒物浓度的增大,  $z_{\max}$  的变化范围逐渐减小并且  $z_{\max}$  的峰值波长逐渐向长波方向移动。相比之下, 当水体悬浮颗粒物浓度较大时 ( $\sim 50 \text{ mg/L}$ ),  $z_{\max}$  集中分布在 0.5~2.0 m, 随波段递增无明显变化。

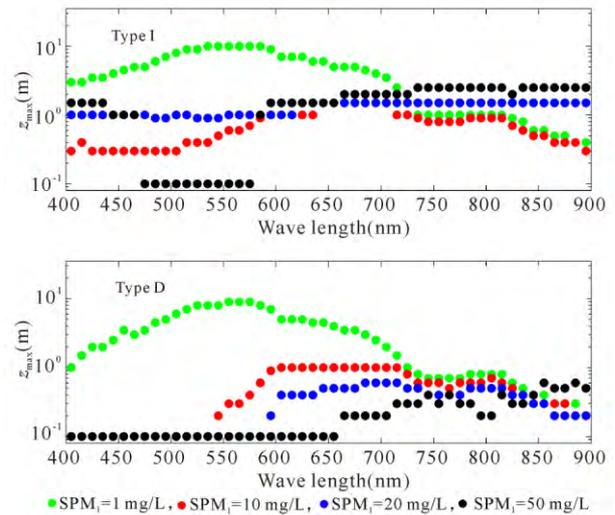


图 4 最大影响水深与波长

Fig. 4 Maximum influence water depth vs wavelength

由 2.1 节的分析可知, 当悬浮颗粒物浓度很大时, 遥感反射率对水深和波长的变化并不敏感, 如图 2f 和 2l 所示, 多条光谱曲线近乎重合, 该现象直接导致较大浓度时  $z_{\max}$  随波段无明显变化。这可能是由于利用 Hydrolight 进行水体辐射传输模拟时, 整个水柱上的悬浮颗粒物浓度随水深增大而迅速增加且总和巨大, 各波段、各水深的模拟结果十分接近, 导致后续分析中出现遥感反射率对水深和波长不敏感。下一步研究将改进参数设置, 以期得到更为合理的模拟结果。

由于水体垂直分布对遥感反射率的敏感波长和最大影响深度的影响, 最终是受到物质组成及其固有光学量的影响, 因此本研究进一步讨论了不同波段下, 水体垂直分布的最大影响水深  $z_{\max}$  与固有光学量之间的相关关系。以表层水体的衰减系数 ( $c_1$ ) 为代表, 其中  $c_1$  可以表示为纯水衰减系数 ( $c_w$ )、悬浮颗粒物衰减系数 ( $c_p$ ) 和 CDOM 衰减系数 ( $c_{CDOM}$ ) 三者之和, 而悬浮颗粒物衰减系数  $c_p$  可以进一步分解为质量比衰减系数 ( $c_p^*$ ) 和  $SPM_1$  的乘积:

$$c_1 = c_w(\lambda) + c_p^*(\lambda) \times SPM_1 + c_{CDOM}(\lambda), \quad (6)$$

其中  $c_p^* = a_p^* + b_p^*$ , 而  $c_{CDOM}$  可由  $SPM_1$  计算得到:

$$c_{CDOM}(\lambda) = 0.07 \times SPM_1^{0.64} \times \exp(-0.0119 \times$$

$(\lambda - 443))$ 。(7)

由图 5 可知,对于 I 型和 D 型水体垂直分布,随着  $c_1$  的增大,  $z_{\max}$  在 445 nm、555 nm、665 nm 和 710 nm 4 个波段基本呈递减趋势。其中红光波段(图 5d)递减趋势最弱,  $z_{\max}$  分布相对集中。造成上述现象的原因与前文讨论的表层悬浮物浓度较高时  $z_{\max}$  的异常分布类似。

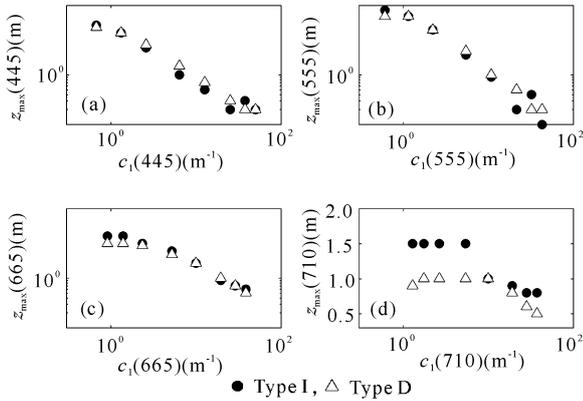


图 5 最大影响水深与表层水体衰减系数

Fig. 5 Maximum influence water depth vs attenuation coefficient of surface water

### 3 结论

本研究以鄱阳湖实测数据为输入条件,利用辐射传输模拟结果研究了两种典型水体垂直分布类型对水表面遥感反射率的影响,得到以下结论:

与均质水体相比,两种不同的水体垂直分布最多会引起遥感反射率 100% 的高估或者 30% 的低估,其中 I 型水体垂直分布使得遥感反射率在全波段被高估,而 D 型则导致遥感反射率被低估,误差均随着水深的增大而减小。

两种类型水体垂直分布的敏感波长变化规律相似:当  $SPM_1$  较小(如  $\leq 20$  mg/L),水深在 1~10 m 时,敏感波长主要集中于 580~710 nm,在相同浓度条件下敏感波长随着水深增大逐渐减小;在同一深度时,敏感波长随着悬浮颗粒物浓度的增大逐渐向长波方向移动;当  $SPM_1$  较大时(例如 50 mg/L),敏感波长主要集中于 750~900 nm,且随水深增大没有明显变化。

两种类型水体在  $SPM_1$  较低时,各波段的最大影响水深各不相同,可达 10 m,并随表层悬浮颗粒物浓度的增大而逐渐减小,峰值波长逐渐向长波方向移动;当  $SPM_1$  较大时,最大影响水深集中于 0.5~2.0 m,随波段递增无明显变化规律。随着表层水体的衰减系数的增大,最大影响水深在 445 nm、555 nm、665 nm 和 710 nm 4 个波段基本呈递减趋势。

本研究结果有助于准确理解表层遥感反射率中所包含的水体垂直结构信息,同时为深入研究非均质水体光学特性及其辐射传输过程提供理论依据。

参考文献:

- [1] FORGET P, BROCHE P, NAUDIN J J. Reflectance sensitivity to solid suspended sediment stratification in coastal water and inversion: A case study[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77(1): 92-103.
- [2] YANG Q, STRAMSKI D, HE M X. Modeling the effects of near-surface plumes of suspended particulate matter on remote-sensing reflectance of coastal waters[J]. Applied Optics, 2013, 52(3): 359-374.
- [3] GORDON H R, MCCLUNEY W R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing[J]. Applied Optics, 1975, 14(2): 413-416.
- [4] GORDON H R. Remote sensing of optical properties in continuously stratified waters[J]. Applied Optics, 1978, 17(12): 1893-1897.
- [5] GORDON H R, CLARK D K. Remote sensing optical properties of a stratified ocean: An improved interpretation[J]. Applied Optics, 1980, 19(20): 3428-3430.
- [6] ZANEVELD J R, BARNARD A H, BOSS E. Theoretical derivation of the depth average of remotely sensed optical parameters[J]. Optics Express, 2005, 13(22): 9052-9061.
- [7] 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.
- [8] PISKOZUB J, NEUMANN T, WOŹNIAK L. Ocean color remote sensing: Choosing the correct depth weighting function[J]. Optics Express, 2008, 16(19): 14683-14688.
- [9] XIU P, LIU Y, TANG J. Variations of ocean colour parameters with nonuniform vertical profiles of chlorophyll concentration[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(3): 831-849.
- [10] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 基于水动力学的水体组分垂直结构对遥感信号的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0201005.
- [11] HUANG C C, LI Y M, WANG Q, et al. Influence of vertical distribution of water constituent on the remote sensing based on hydrodynamics[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0201005.
- [12] 张本. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 科学技术出版社, 1988.
- [13] ZHANG B. Studies on Poyang Lake[M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1988.
- [14] 张荣峰. 鄱阳湖水系泥沙特性及对环境的影响[J]. 江

西水利科技,1991,17(3):237-241.

ZHANG R F. Sediment characteristics of Poyang Lake river system and its impact on the environment[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology,1991,17(3): 237-241.

[13] FENG L, HU C M, CHEN X L, et al. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010[J]. Remote Sensing of Environment,2012,121:80-92.

[14] HUANG J, CHEN L Q, CHEN X L, et al. Validation of semi-analytical inversion models for inherent optical properties from ocean color in coastal Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Oceanography, 2013, 69 (6):713-725.

[15] 黄珏,陈晓玲,陈莉琼,等.鄱阳湖高浑浊水体悬浮颗粒物粒径分布及其对遥感反演的影响[J].光谱学与光谱分析,2014,34(11):3085-3089.

HUANG J, CHEN X L, CHEN L Q, et al. Particles

size distribution and its influence on remote sensing retrieval of turbid Poyang Lake [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2014,34(11):3085-3089.

[16] 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[J].光谱学与光谱分析,2010,30(2):489-494.

XI Y, DU K P, ZHANG L H, et al. The influence of nonuniform vertical profiles of chlorophyll concentration on apparent optical properties [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(2):489-494.

[17] BABIN M, STRAMSKI D, FERRARI G M, et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles and dissolved organic matter in coastal waters around Europe [J]. Journal of Geophysical Research,2003,108(C7):3211.

(责任编辑:陆雁)

### 《广西科学》致谢 2015 年—2016 年审稿专家

《广西科学》在主办单位,以及主编、编委和审稿专家的大力支持下,圆满完成了 2016 年 1~6 期的编辑和出版工作。专家们在百忙中承担繁重的审稿任务,是你们严谨治学的态度及奉献精神保证了《广西科学》的学术质量。同时,编辑和投稿作者有幸也得到了审稿专家的帮助。《广西科学》编辑部在此谨向以下审稿专家致以诚挚的敬意和谢意!并祝各位在新的一年里身体健康,万事如意!

丁兰平	丁向东	万中	王萌	王勤	王瑁	王一兵	王为东	王玉霞
王志萍	王青艳	王彦昌	王桂文	王祥红	邓雁如	韦宵	韦宇拓	韦志杨
韦保耀	冯春华	申玉春	农旭华	刘小玲	刘长春	刘布鸣	刘永学	刘永贤
刘幽燕	刘洪波	刘雄民	吕镇梅	孙丰强	安俊岭	朱坤	朱志斌	江涛
祁超	许晓东	严红革	何斌	何铁光	何斌源	吴仁海	吴烈善	吴琴瑟
吴群英	宋金明	张玉和	张乔民	张鸿雁	李东飞	李秉正	李谊纯	李陶深
李瑞杰	杨勇	杨兵初	杨章旗	沈爱国	苏琴	邵伟增	陆光涛	陆登俊
陈波	陈可泉	侍茂崇	周本杰	周浩郎	庞浩	易湘茜	武波	郑媛媛
郑德凤	姜岷	胡小波	胡亚芹	赵进创	赵慧敏	郝林华	唐立	唐亚
唐赛春	徐尚进	莫宁	莫竹承	贾洪飞	陶站华	高劲松	高晓清	高程海
梁和	梁世楚	阎冰	黄日明	黄寿先	黄凯	黄国强	黄庶识	温远光
童茵	童张法	蒋承建	谢能中	奚衍光	蒙健宗	赖茂祥	赖俊翔	鲍献文
廖咏梅	管卫兵	裴道武	谭伟福	谭光兴	谭宗琨	樊治平	滕建文	潘为高
潘红平	黎广钊	黎宁	黎晓峰	薛郁	戴雪荣			

注:专家名单按姓氏笔画顺序排序,截止到 2016 年 12 月 20 日。

《广西科学》编辑部

2016 年 12 月 20 日