

# 台湾海峡真光层深度半分析算法 遥感反演的真实性检验

陈晶晶<sup>1</sup>, 商少平<sup>1,2</sup>, 商少凌<sup>1\*</sup>

(1. 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 2. 厦门大学海洋学系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 应用 SeaWiFS 遥感数据, 采用最新的基于固有光学特性的半分析算法进行台湾海峡真光层反演, 与卫星过境时间  $\pm 2$  小时内实测的数据比对的结果, 平均相对误差为 16.7%, 均方根误差为 0.077 81, 遥感反演与实测数据之间相关系数达到 0.87. 相对于叶绿素反演算法(平均相对误差 38.0%, 均方根误差 0.152 4, 相关系数 0.56), 有较高的反演准确性. 说明该算法不仅适用于 Gulf of Mexico、Monterey Bay 和 Arabian Sea, 也适用于台湾海峡.

**关键词:** 台湾海峡; 真光层深度; 遥感半分析算法; 叶绿素

**中图分类号:** P 731.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2007)S1-0012-06

真光层深度  $Z_{eu}$  (Euphotic Zone Depth) 是指光合有效辐照度 PAR (Photosynthetic Available Radiation) 下降到表层量值的 1% 的深度<sup>[1-3]</sup>. 真光层深度是描述海水光学特性的参数之一, 海水中浮游植物、无机悬浮物、黄色物质的含量和成分与其密切相关. 在物理海洋学上, 真光层深度的分布特征可以用于辅助水团、流系的识别; 同时, 真光层深度是海洋生物进行有效光合作用的深度, 是研究浮游植物光合作用、海洋初级生产力、全球碳通量变化的重要参数.

由于船舶测量监测大范围的真光层深度时空分布相当困难, 目前一般采用间接的方法进行计算. 比较常见的算法是根据可见光漫射衰减系数  $K$ , 利用辐射传输模式<sup>[4-5]</sup>, 反演出真光层深度. 漫射衰减系数  $K$  受多方面因素的影响, 不同海区不同深度所含物质种类、浓度不一样, 会导致光漫射衰减系数发生变化. 不同学者对漫射衰减系数进行研究<sup>[6-11]</sup>, 这些研究大部分是基于表观光学属性(AOP)的经验模式. 而最为简便的算法, 是根据叶绿素推算. 叶绿素与光衰减系数有很好的相关性, 这种生物-光学特性直接影响着水下光合有效辐射, 从而影响真光层深度<sup>[5,12]</sup> (以下记为 [Chl] 算法).

目前最新的方法, 是 Lee 等基于固有光学特性 (IOP) 发展的半分析模型<sup>[13-14]</sup> (以下记为 Lee 算法),

应用 490 nm 波段的吸收系数  $a$  和后项散射系数  $b_b$ , 计算得到可见光波段 (350 ~ 700 nm) 的漫射衰减系数  $K_{vis}$ <sup>[14]</sup>, 进而反演得到真光层深度. 该模型在墨西哥湾 (Gulf of Mexico)、Monterey Bay 和 Arabian Sea 反演的结果, 与实际观测值相当吻合, 平均误差仅为 13.7% (真光层范围 4.3 ~ 82.0 m), 但在其他海区, 仍缺乏检验. 本文将利用 1998、1999、2004 年台湾海峡夏季航次获得的实测数据, 检验该模型在中国近海的反演结果与实际观测的吻合程度.

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

实测 PAR 剖面数据及表层 [Chl] 数据来自国家自然科学基金重点项目“台湾海峡生源要素生物地球化学过程”1998 年 8 月 10 ~ 16 日和 1999 年 8 月 12 ~ 18 日航次、“台湾海峡上升流区浮游植物对海洋环境年际变动的响应”2004 年 7 月 26 日 ~ 8 月 6 日航次, 站位分布见图 1.

遥感反射率  $R_s$  来自美国 NASA 提供 SeaWiFS 的 L2 产品, 选取日期与实测站位日期相同数据. SeaWiFS (MLAC) 数据应用 SeaDAS 软件, 处理成  $116^\circ \sim 121^\circ E$ ,  $21.5^\circ \sim 26.5^\circ N$  区域的 L3 数据. 实测 PAR 剖面数据由安装在 SBE19 CTD 上的 PAR 传感器测得, 深度  $z$  由压力传感器得到.

由于云覆盖的影响, 以及空间观测与海上观测时间的不一致, 在卫星过境 (1 h 时间间隔内的实测匹配数据, 仅有 6 组. 故而我们取不同的空间与时间匹配窗口, 构成几种比对方案, 实测与遥感匹配的数据量

收稿日期: 2007-04-10

基金项目: 国家自然科学基金 (40376031, 40331004, 40521003), 863 计划 (2006AA09A302), 教育部创新群体计划, 厦门大学新世纪人才计划共同资助

\*通讯作者: slshang@xmu.edu.cn

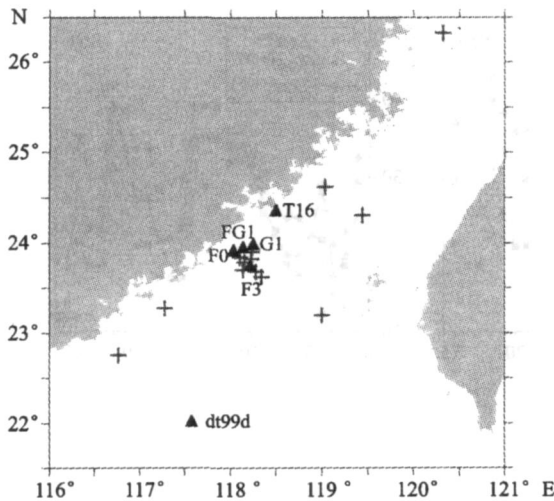


图 1 1998,1999,2004 年台湾海峡夏季航次站位图  
Fig. 1 Map of stations during 1998,1999,2004 cruise in Taiwan Strait

见表 1. 其中空间窗口 1 表示与实际观测站位相应的遥感匹配点数据,记做 Sp1;空间窗口 5 表示取实际观测站位相应的遥感匹配点周边 5 × 5 像素的平均值,记做 Sp5;空间窗口 9 表示取实际观测站位相应的遥感匹配点周边 9 × 9 像素的平均值,记做 Sp9.

表 1 不同时间、空间窗口下匹配的数据量

Tab. 1 Matched numbers in different time and space

窗口	±2 h	±3 h	±4 h
Sp1	12	20	22
Sp5	15	23	25
Sp9	16	24	26

### 1.2 PAR 计算 Zeu

不同深度 PAR 的比值用下式表示:

$$r_{PAR}(z) = \frac{PAR(z)}{PAR(0)} \quad (1)$$

其中, PAR(z) 表示深度 z 处的光合有效辐射, PAR(0) 表示海表面处光合有效辐射. 真光层深度 Zeu (r<sub>PAR</sub> 等于 1% 时) 就由 r<sub>PAR</sub>(z) 的垂直剖面来决定, 记做 Zeu<sup>mea</sup>.

### 1.3 Zeu 遥感反演算法

(i) Lee 算法

根据 Lee 算法<sup>[2]</sup>, 可见光范围 (350 ~ 700 nm) 内, 深度 z 处的下行辐照度 E<sub>vis</sub>(z) 与海水表面辐照度 E<sub>vis</sub>(0) 随深度的增加成指数衰减, 关系如下<sup>[2-3,5]</sup>:

$$E_{vis}(z) = E_{vis}(0) \cdot e^{-K_{vis}(z) \cdot z} \quad (2)$$

由于真光层为下行辐照度降到海表面辐照度 1% 的深度, 由 (2) 得

$$K_{vis}(z) \cdot Zeu = 4.605 \quad (3)$$

其中, K<sub>vis</sub>(z) 为光衰减系数, 在可见光范围内 (350 ~ 700 nm) 不仅与水深有关, 还与固有光学属性 (IOP) 密切相关<sup>[2,14]</sup>, 形式如下:

$$K_{vis}(z) = K_1 + \frac{K_2}{(1+z)^{0.5}} \quad (4)$$

其中, K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub> 都是水的吸收系数 a(490)、后向散射系数 b<sub>b</sub>(490)、太阳高度角 α 的函数. 只要给定一个太阳高度角 α 和 a(490)、b<sub>b</sub>(490), 可以求出任意深度的 K<sub>vis</sub>(z). 联合公式 (2) 和 (3) 可求解得到 Zeu, 记做 Zeu<sup>dir-IOP</sup>.

a(490)、b<sub>b</sub>(490) 应用 QAA 半分析算法<sup>[2,15]</sup> 由 SeaWiFS 遥感反射率 R<sub>rs</sub> 反演得到.

(ii) [Chl] 算法

应用 [Chl] 反演 Zeu 的经验模型为<sup>[5,12]</sup>:

$$Zeu = a [Chl]^b \quad (5)$$

其中, a、b 是系数, 分别取 34.0 和 -0.39<sup>[2]</sup>. 由此反演的 Zeu, 记做 Zeu<sup>dir-[Chl]</sup>. 本研究, [Chl] 是由 SeaWiFS 数据 R<sub>rs</sub> 反演得到的表层叶绿素浓度, 记做 [Chl]<sup>dir</sup>, 公式采用 OC4V4 算法<sup>[16]</sup>:

$$[Chl] = 10^{0.366 - 3.067 + 1.93 \cdot 2 + 0.649 \cdot 3 - 1.532 \cdot 4} \quad (6)$$

$$= \log \left( \frac{\max(R_{rs}(440, 490, 510))}{R_{rs}(555)} \right) \quad (7)$$

### 1.4 误差计算

为了比较反演结果与实测结果, 我们使用两种误差统计方法: 平均误差 (Average Error) 和均方根误差 RMS (Root Mean Square). 定义如下:

$$= \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Zeu_i^{dir} - Zeu_i^{mea}}{Zeu_i^{mea}} \right| \right) \times 100\% \quad (8)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\log(Zeu_i^{dir}) - \log(Zeu_i^{mea})]^2} \quad (9)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 实测 Zeu 与反演结果的比较

从分布上看 (图 2), 实测与遥感反演 Zeu 的变化趋势基本一致, 但遥感反演普遍偏高. Zeu<sup>dir-IOP</sup> 的平均值要高出实测 5 m 左右, Zeu<sup>dir-[Chl]</sup> 较实测高 9 m 左右. 就 Sp1 和 Sp5 两种方案而言, 实测与遥感反演均在 T16 站 (1998) 最低, 空间变化一致. 然而当空间窗口放大时 (Sp9), F0 站 (2004) 得以进入匹配数据组, 成为实测数据中的最低值, 但遥感反演的结果, 依然是 T16 站最低. 究其原因, 与 F0 站匹配的遥感反演值实际上来自其周边 9 × 9 像素 (约 80 km<sup>2</sup> 的区域) 的平均, F0 站点本身并无遥感数据, 而该处贴近

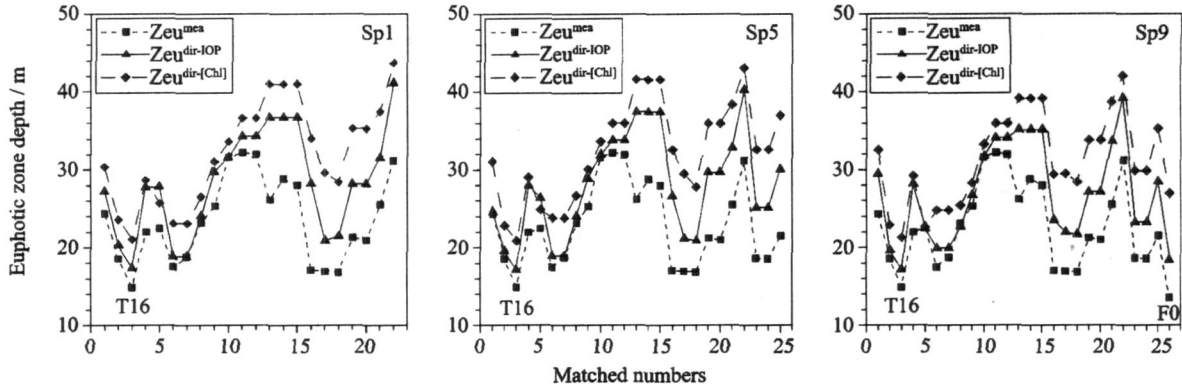


图 2 Zeu 的实测与遥感反演分布(其中包含了 ±3 h、±2 h)

Fig. 2 Zeu from in situ and derived remote sensing

岸,夏季常发生上升流导致浮游植物水华<sup>[17]</sup>,各种海洋环境参数空间梯度较大,所以容易出现与实测值的出入.可见在类似变化剧烈的区域,放大空间窗口进行比对,必须慎重.

利用 Lee 算法进行遥感反演 ( $Zeu^{dir-IOP}$ ) 与实测值 ( $Zeu^{mea}$ ) 的比较统计结果见表 2. 结果表明 Lee 算法反演数据与实测数据显著相关(图 3). 平均误差范围在 16.7% (Sp1, ±2 h) ~ 22.6% (Sp5, ±4 h), 均方根误差范围 0.077 8 (Sp1, ±2 h) ~ 0.701 9 (Sp5, ±4 h), 最大误差 65.1% (Sp1), 出现在 2004 年 8 月 6 日的 G1 站, 卫星过境时间与实测时间差为 3 h.

此外,无论是平均误差 (Average error)、最大误差 (Max error) 还是均方根误差 (RMS) 都在最小的空间窗口 (Sp1)、最小的时间窗口 (±2 h) 降到最低,充分说明空间、时间越匹配反演的精度越高.

[Chl] 算法反演  $Zeu^{dir-[Chl]}$  与  $Zeu^{mea}$  比较 (Sp1) (表 3), 二者同样显著相关(图 4). 平均误差在 39% 左

右,均方根误差在 0.15 左右,最大误差 99.1%, 同样出现在 2004 年 8 月 6 日 G1 站. 同时我们统计了 [Chl] 的反演结果,  $[Chl]^{mea}$  范围是 0.743 ~ 6.292  $mg/m^3$ ;  $[Chl]^{dir}$  范围是 0.231 ~ 3.410  $mg/m^3$ . 两者比较的平均误差范围 30.5% (±3 h) ~ 32.1% (±2 h), 均方根误差范围 0.140 4 (±2 h) ~ 0.162 2 (±4 h)%, 最大误差 79.7%, 出现在 2004 年 8 月 6 日 FGI 站. 图 4 可以看出,由 OC4V4 算法得到的 [Chl] 与实测的 [Chl] 的斜率基本上为 1  $\diamond$  1, 其结果是令人满意的,这与该算法在台湾海峡的检验结果相一致<sup>[18]</sup>.

[Chl] 算法误差明显大于 Lee 算法, 其主要原因可能有二. 首先,由于 [Chl] 算法,要求使用 [Chl] 的水柱平均值或水柱内的积分值<sup>[12]</sup>, 我们通过卫星遥感数据只能得到表层 [Chl]. 其次,由于 OC4V4 算法本身的不确定性<sup>[19]</sup> 及 [Chl] 与 Zeu 的指数经验关系,都有可能致误差的产生.

表 2 Lee 算法与 Zeu 实测值比较结果

Tab. 2 Comparison between in situ Zeu and Lee approach

	平均误差 / %			均方根误差			最大误差 / %			相关系数 $r$			达到 95% 显著相关的 $r$		
	Sp1	Sp5	Sp9	Sp1	Sp5	Sp9	Sp1	Sp5	Sp9	Sp1	Sp5	Sp9	Sp1	Sp5	Sp9
±4h	21.3	22.6	20.0	0.0961	0.1019	0.0888	65.1	55.9	37.9	0.87	0.84	0.90	0.40	0.38	0.37
±3h	20.6	22.1	19.5	0.0945	0.1014	0.0875	65.1	55.9	37.9	0.85	0.82	0.89	0.42	0.40	0.39
±2h	16.7	20.1	18.6	0.0778	0.0941	0.0845	34.4	41.4	36.4	0.87	0.76	0.85	0.53	0.48	0.47

表 3 [Chl] 算法与 Zeu 实测值比较结果

Tab. 3 Comparison between in situ Zeu and [Chl] approach

	平均误差 / %			均方根误差			最大误差 / %			相关系数 $r$			达到 95% 显著相关的 $r$		
	±4 h	±3 h	±2 h	±4 h	±3 h	±2 h	±4 h	±3 h	±2 h	±4 h	±3 h	±2 h	±4 h	±3 h	±2 h
[Chl] 算法	39.7	40.1	38.0	0.1562	0.1585	0.1524	99.1	99.1	74.3	0.73	0.69	0.56	0.40	0.43	0.53
OC4V4	32.0	30.5	32.1	0.1622	0.1444	0.1404	79.7	79.7	79.7	0.71	0.83	0.81			

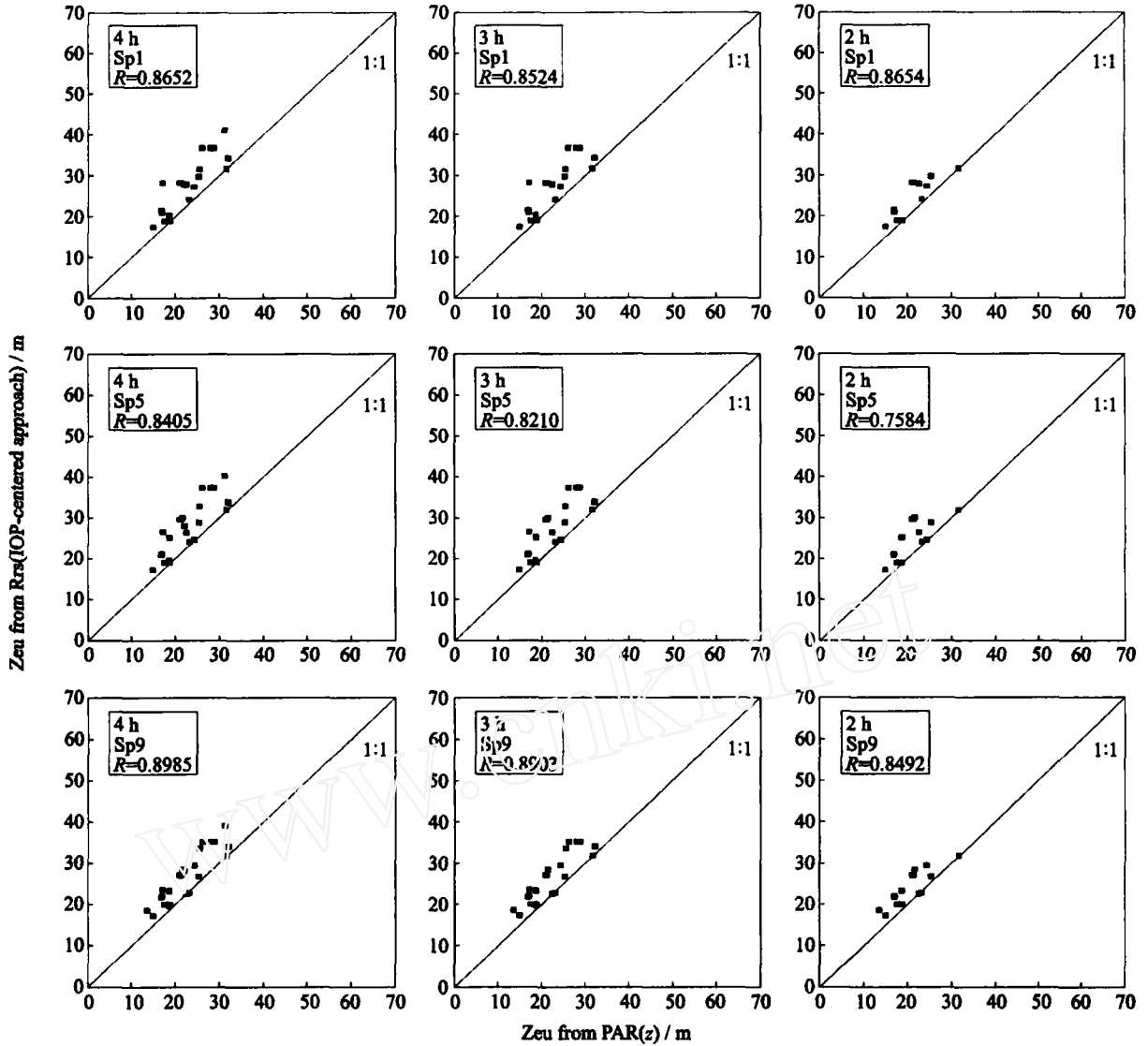


图3 Lee 算法与 Zeu 实测值比较

Fig.3 Comparison between in situ Zeu and Lee approach

### 2.2 台湾海峡 Zeu 遥感反演结果与其他海区的比较

Lee 算法应用于 Gulf of Mexico、the Arabian Sea、the Monterey Bay 得到非常好的结果<sup>[2]</sup>, 简称 Mex. 将 Lee 算法在台湾海峡的结果 (Sp1、±2 h) 与在 Mex 得到的结果相比较 (表 4) 可见, Mex 的结果整体上要优于台湾海峡的结果. 但必须指出的是, Mex

的反演, 使用的是船测  $R_{rs}$ , 时间上与 PAR 测量同步进行; 而本研究完全采用 SeaWiFS 卫星遥感得到的  $R_{rs}$ , 而且时间上与实测 PAR 没有完全匹配; 由此得到的检验结果, RMS 在 0.07 左右, 是令人鼓舞的.

中国其他海区应用其他算法反演 Zeu 的统计检验结果, 尚未见报道. 类似的参数-透明度的反演结果有两例, 王晓梅、唐军武等人<sup>[9]</sup> 在区域化参数的基础

表 4 台湾海峡结果与 Mex 结果比较

Tab.4 Comparison between TW and Mex

	Lee 算法		[Chl]算法		OC4V4 反演 [Chl]	
	TW	Mex	TW	Mex	TW	Mex
平均误差 (%)	16.67	13.70	38.02	32.70	32.09	75.2
最大误差 (%)	34.39	63.50	74.30	21.8	79.74	56.5
均方根误差	0.778	0.079	0.1524	0.162	0.1404	0.329

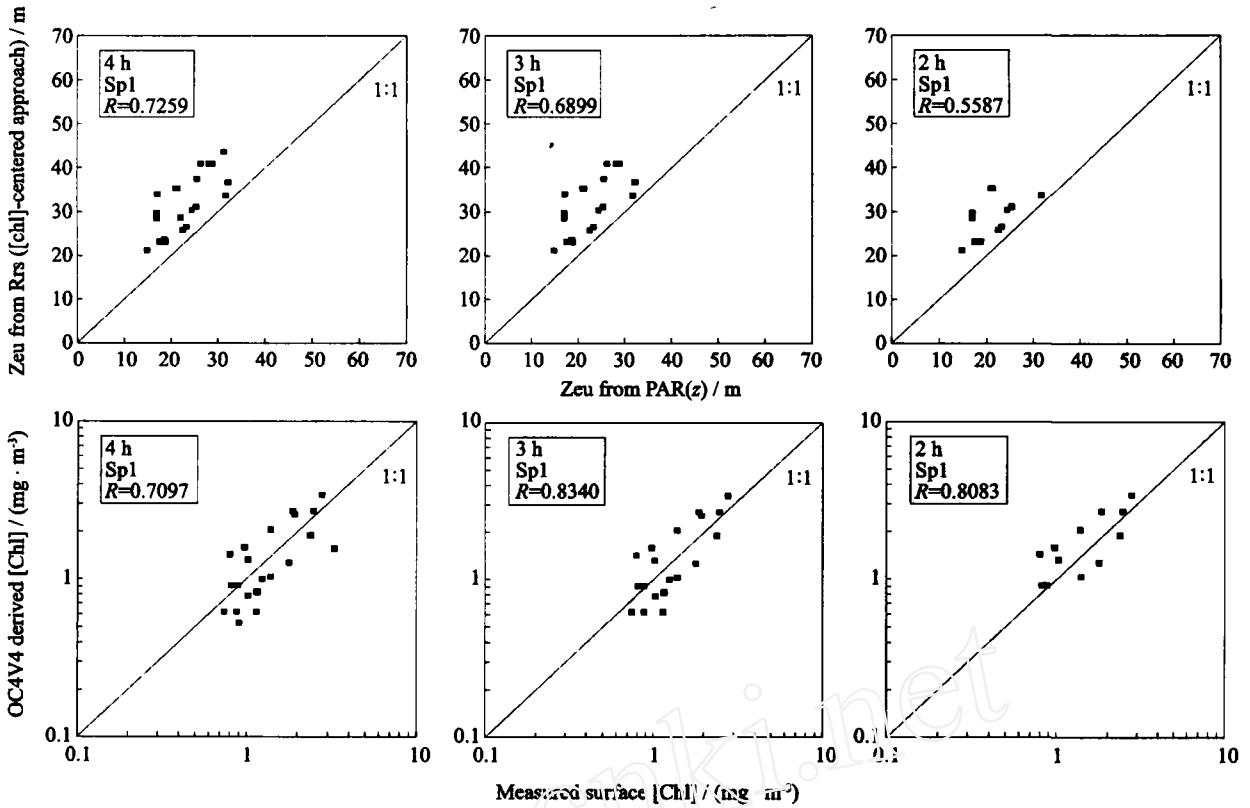


图4 [Chl]算法与 Zeu 实测值、OC4V4 算法与 [Chl] 实测值比较

Fig. 4 Comparison between in situ Zeu and [Chl] approach ,comparison between in situ [Chl] and OC4V4 approach

上应用统计模型对黄东海透明度进行反演,平均相对误差为 16.8%;何贤强、潘德炉等人<sup>[20]</sup>建立海水透明度半分析模式,相对误差为 22.6%。Lee 算法利用 SeaWiFS 的  $R_s$  反演近岸、水浅、叶绿素变动剧烈<sup>[21]</sup>的台湾海峡的真光层深度,不需要进行区域化调试,且 RMS 仅为 0.0778,显然具有明显优势。

### 3 结论

我们采用三个航次实测数据对遥感反演真光层深度进行检验, Lee 算法反演 RMS 约 0.07,最大误差 65.1%,平均误差范围 16.7%~22.6%。

Lee 算法与相对简便的 [Chl] 算法相比,所反演的真光层深度,总体趋势是一致的,但是 Lee 反演算法有较高的反演精度。Lee 算法是基于 IOP 进行反演,并不要求水体性质,具有普适性。[Chl] 算法是经验算法,虽然应用 OC4V4 算法进行叶绿素的反演的结果令人比较满意,但对于台湾海峡比较复杂的水体性质, [Chl] 与 Zeu 的指数关系似乎更多的依赖于经验系数的选取,故精度略低。

致谢:感谢近海海洋环境科学国家重点实验室台湾海峡数据中心提供实测数据, NASA SeaWiFS 小组提供遥感数据,

遥感数据的使用符合 NASA 关于科学研究应用数据协议的规定。

### 参考文献:

- [1] Morel A, Antoine D, Babin M, et al. Measured and modeled primary production in the northeast Atlantic (EUMELI J GOF S program): the impact of natural variations in photosynthetic parameters on model predictive skill [J]. Deep-Sea Research I, 1996, 43(8): 1273 - 1304.
- [2] Lee Z P, Weidemann A, Kindle J, et al. Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing [J]. JGR, 2007, 112, C03009.
- [3] 李国胜, 梁强, 李柏良. 东海真光层深度的遥感反演与影响机理研究 [J]. 自然科学进展, 2003, 13(1): 90 - 95.
- [4] 曹文熙, 黄良民. 海洋生物-光学研究进展与展望 [J]. 自然科学进展, 2004, 14(1): 20 - 27.
- [5] 曹文熙, 杨跃忠. 海洋光合有效辐射分布的计算模式 [J]. 热带海洋学报, 2002, 21(3): 47 - 54.
- [6] Austin R W, Petzold T. The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the coastal zone color scanner [M]//Gower J F R, Oceanography from space. New York: Plenum Press, 1981: 239 - 256.
- [7] Mueller J L. SeaWiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient, K(490), using water-leaving radiances at 490 and 555 nm [M]//SeaWiFS postlaunch calibration

- and validation analyses ,Part 3 ,NASA Tech Memo ,2000 - 206892 ,2000 ,11 :24 - 27.
- [8] 李武,梁懋钢,陈涛. 海中准直光衰减系数与透明度盘深度的经验关系[J]. 海洋学报,1993,15(5):130 - 135.
- [9] 王晓梅,唐军武,丁静,等. 黄海、东海二类水体漫衰减系数与透明度反演模式研究[J]. 海洋学报,2005,27(5):39 - 45.
- [10] 张清凌,陈楚群,施平,等. 南沙群岛海域水体漫衰减系数  $K_d(490)$  的特性研究[J]. 热带海洋学报,2003,22(1):10 - 22.
- [11] 彭海龙,孙从容,张正,等. 黄东海区光谱漫衰减系数特性研究[J]. 海洋通报,2004,23(4):16 - 18.
- [12] Morel A, Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: a reappraisal [J]. JGR,2001,106(C4):7163 - 7180.
- [13] Lee Z P, Du K P, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance [J]. JGR,2005,110,C02016.
- [14] Lee Z P, Du K P, Arnone R, et al. Penetration of solar radiation in the upper ocean: a numerical model for oceanic and coastal waters [J]. JGR,2005,110,C09019.
- [15] Lee Z P, Carder K, Arnone R. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. Applied Optics, 2002,41(27):5755 - 5772.
- [16] 曾银东,商少凌,张彩云,等. 南海东北部基于标准经验算法的遥感叶绿素 a 反演结果比较分析[J]. 海洋科学,2004,28(8):14 - 18.
- [17] 洪华生,丘书院,阮五崎,等. 闽南 2 台湾浅滩渔场上升流生态系研究概述 [C]//洪华生,等. 闽南-台湾浅滩渔场上升流生态系研究. 北京:科学出版社,1991.
- [18] Zhang C Y, Hu C M, Shang S L, et al. Bridging between SeaWiFS and MODIS for continuity of chlorophyll-a concentration assessments off Southeastern China [J]. Remote Sensing Environment,2006,102:250 - 263.
- [19] O Reilly J E, Maritorena S, Siegel D, et al. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4 [M]//Hooker S B, Firestone E R, eds. SeaWiFS postlaunch technical report series SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Part 3. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000,11:9 - 23.
- [20] 何贤强,潘德炉,毛志华,等. 利用 SeaWiFS 反演海水透明度的模式研究[J]. 海洋科学,2004,26(5):55 - 62.
- [21] Shang S L, Zhang C Y, Hong H S, et al. Short-term variability of chlorophyll associated with upwelling events in the Taiwan Strait region during southeast monsoon of 1998 [J]. Deep-Sea Research, 2004,51(10/11):1113 - 1127.

## A Test of a Semi-analytical Algorithm for Euphotic Zone Depth in the Taiwan Strait

CHEN Jing-jing<sup>1</sup>, SHANG Shao-ping<sup>1,2</sup>, SHANG Shao-ling<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science(Xiamen University),

2. Department of Oceanography, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** This article employs SeaWiFS data over the Taiwan Strait to evaluate a semi-analytical algorithm for euphotic zone depth. This algorithm is based on water's inherent optical properties (IOP), which can be near-analytically calculated from spectral remote-sensing reflectance (provided by SeaWiFS). Compared with in situ  $Z_{eu}(\pm 2\text{ h})$ , average error is 16.7%, root mean square is 0.0778 and correlation coefficient is 0.87. It has higher accuracy compared to chlorophyll-a approach (average error is 38.0%, root mean square is 0.1524, correlation coefficient is 0.56). It is found that the new algorithm not only worked well with waters of the Gulf of Mexico, Monterey Bay and Arabian Sea, but also worked well with waters of the Taiwan Strait.

**Key words:** Taiwan Strait; euphotic zone depth; remote sensing quasi-analytical algorithm; chlorophyll