

张焕炜, 马毅, 张靖宇. 大气校正模型对多光谱水深反演影响的多维度分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(7): 145–160, doi:10.12284/hyxb2022122
Zhang Huanwei, Ma Yi, Zhang Jingyu. Multi-dimensional analysis of atmospheric correction models on multi-spectral water depth inversion[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(7): 145–160, doi:10.12284/hyxb2022122

大气校正模型对多光谱水深反演影响的多维度分析

张焕炜¹, 马毅^{1,2*}, 张靖宇¹

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 大气校正是水体定量遥感的基础与前提。本文从大气校正模型、大气校正模型参数、水体组分差异以及水深反演波段组合方式 4 个维度探讨大气校正模型对水深反演的影响。研究采用 6S、FLAASH、ACOLITE 与 QUAC 4 种大气校正模型, 选取大陆型、海洋型与城市型气溶胶模式, 以瓦胡岛西北侧与谢米亚岛周边浅水作为清洁水体研究区, 以辽东浅滩与槟城海峡作为浑浊水体研究区, 基于 Landsat-8 多光谱影像开展大气校正, 并采用 8 种波段组合方式进行水深遥感反演。研究结果表明: (1) 4 种大气校正模型均可在一定程度上削弱大气对水体信号的影响; 因参数选取以及研究区水体组分的不同, 不同模型的校正结果存在一定差异; 两类水体反射率峰值分别出现在蓝波段与绿波段; (2) 6S 大气校正模型鲁棒性较强, 该模型因研究区水体组分发生变化导致对应的水深反演结果与其余模型相比波动较小; FLAASH 模型在海洋型和城市型两种气溶胶模式水深反演结果在浑浊水体存在较为明显的差异, 辽东浅滩浅水区平均相对误差相差 7.9%; ACOLITE 模型受水体类型影响显著且对浑浊水体具有优越性与稳定性, 平均相对误差较 FLAASH 降低 5.6%; (3) 多波段水深反演精度普遍优于单波段, 但反演精度与波段数目之间无显著的相关性; 水深反演波段组合方式对不同研究区敏感性不同, 清洁水体三波段模型的反演精度较好, 浑浊水体中四波段模型的反演精度最优, 平均相对误差较三波段模型降低达 5.6%。

关键词: 大气校正; 气溶胶; 水体组分; 水深反演; 波段组合; 精度分析

中图分类号: TP79; TP751

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)07-0145-16

1 引言

水深是交通运输、近海工程和滩涂开发的重要基础数据。遥感是水深测量的一种新兴技术手段, 与传统的水深测量方法相比, 遥感有大范围、低成本和重复观测等优点, 可以实现水深的宏观动态观测, 在一定程度上弥补了传统水深测量方法的不足。

卫星传感器接收到的光信号包括大气信息和水体信息。水体信息中由水底反射进入传感器的信号是水下地形的直接反映, 是水深遥感的主要信息来源^[1]。

在开阔的海洋, 大气信息约占 90%, 而在沿岸水域有时会高于 90%^[2], 因此有效地消除大气影响是决定水深反演精度的首要环节。前人将大气贡献分离为瑞利散射和气溶胶散射两部分, 并假设近红外波段离水辐射为 0, 成功对一类水体进行大气校正, 为大气校正提供了经典方法^[3-4]。Ruddick 等^[5]假设两个近红外波段离水辐射反射率比值在空间上均匀分布, 对标准大气校正算法进行改进, 应用于比利时沿海水域, 提供了一种可应用于浑浊水体的大气校正算法。迄今为止, 国内外已开发出 30 余个大气校正模型, 其中

收稿日期: 2021-08-14; 修订日期: 2022-01-13。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51839002); 国家自然科学基金青年项目(41906158); 海洋资源环境遥感信息处理业务应用示范系统高分专项(41-Y30F07-9001-20/22)。

作者简介: 张焕炜(1998—), 女, 河南省安阳市人, 主要从事海洋遥感与应用研究。E-mail: huanwei98@163.com

* 通信作者: 马毅, 研究员, 主要从事海岛海岸带遥感与应用研究。E-mail: mayimail@fio.org.cn

6S(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)模型、辐射传输模型、LOWTRAN(Low Resolution Transmission)模型、MORTAN(Moderate Resolution Transmission)模型与 ATCOR(A Spatially-Adaptive Fast Atmospheric Correction)模型等应用最为广泛^[6-7]。孔金玲等^[6]以曹妃甸近岸水体为例,采用FLAASH(Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)模型与6S模型两种大气校正模型对MODIS影像进行对比试验,并对校正结果进行水体悬浮泥沙浓度反演。Wang等^[8]为探讨大气校正算法对悬浮颗粒物浓度值的一致性影响,采用4种大气校正算法对巢湖进行试验,发现MUMM(Management Unit of the North Seas Mathematical Model)算法表现出较好的优越性。

水深遥感技术在国外开展较早,随着第一颗遥感卫星发射成功,利用多光谱遥感数据提取水深的研究得到了迅速发展,在水深遥感模型构建方面形成了理论解析模型、半理论半经验模型与统计模型3大类^[1,9]。理论解析模型反演精度高,但计算过程十分复杂,需要大量水体光学参数^[10-11];半理论半经验模型是理论解析模型的简化,所需参数较少,在具有一定普适性的前提下,不仅在很大程度上减少了反演的计算量也保证了水深反演的精度^[9,11];统计模型需要通过建立遥感图像光谱值和参考水深之间的关系来建立拟合模型,该模型在特定时间和水域具有较好的水深反演能力,但不具有普适性^[12];半理论半经验模型是目前水深光学遥感应用相对广泛的模型。

目前,国内外大气校正研究工作主要聚焦在水色要素反演方面,大气校正方法对水深反演影响的研究关注较少。许海蓬等^[13]、张彦彦等^[14]采用暗像元(Dark Object Subjection, DOS)、FLAASH与6S大气校正模型对我国西沙永兴岛周边进行水深反演,且只选取了海洋型气溶胶模式,事实上,在一般情况下,沿岸水体上空气溶胶特性复杂多变,不同气溶胶模式会导致相异的大气校正结果;同时,该项研究主要侧重于波段选取、组合方式以及控制点与检查点比例对水深反演的影响,没有呈现和分析遥感图像大气校正的结果,也未考虑因水体组分差异带来的区别。

本研究以Landsat-8陆地成像仪(Operational Land Imager, OLI)多光谱影像为数据源,采用主流的6S、FLAASH、ACOLITE(Atmospheric Correction for OLI“LITE”)与快速大气校正(Quick Atmospheric Correction, QUAC)4种大气校正模型,其中6S模型选取大陆型、海洋型与城市型3种气溶胶模式,FLAASH模

型选取海洋型与城市型两种气溶胶模式,对水体清澈的瓦胡岛西北侧、谢米亚岛和水质浑浊的辽东浅滩和滨城海峡进行大气校正,并利用多波段对数线性模型,共8种波段组合方式进行水深反演,旨在从大气校正模型、大气校正模型参数、水体组分差异以及水深反演波段组合方式等多维度探讨不同水体大气校正模型对水深反演的影响。

2 研究区与数据

为探讨水体组分与研究区底质类型对水深反演的影响,本研究选取瓦胡岛与谢米亚岛为清洁水体研究区,辽东浅滩与滨城海峡为浑浊水体研究区。采用空间分辨率为30m的Landsat-8多光谱遥感影像,结合LiDAR测深数据与海图数据进行水深反演。本文试验水深范围为0~20m,并按照约2:1的比例对控制点与检查点进行随机抽样。

2.1 研究区

2.1.1 清洁水体区域

瓦胡岛是夏威夷群岛中的第三大岛屿,岛上檀香山是美国夏威夷州首府所在地。该岛面积为1545km²,海岸线长为365km,大约呈现钻石状,其海岸曲折,沿岸多为砂质与积岩,水质清澈,本研究区位于瓦胡岛西北侧。谢米亚岛为美军空军基地,位于北太平洋,海岛一般被珊瑚礁所包围,东部与南部为海藻标记区,岛屿西北方向为岩石覆盖区,周围浅滩深度约为3m或更浅,岛屿周围水质清澈^[15],研究区位置如图1所示。

瓦胡岛与谢米亚岛遥感影像成像时间分别为2016年3月26日20:59(UTC)与2013年4月27日23:21(UTC);两幅影像成像时刻研究区上空无云,影像质量较好,可清晰辨别研究区岸线。瓦胡岛参考水深值为LiDAR测深数据,由机载SHOALS(Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey)系统采集,该系统是目前世界上应用最广泛的LiDAR测深系统之一,最大测量深度可达40m,垂直方向误差小于0.15m,测深数据点间隔在3~15m之间^[16]。谢米亚岛参考水深值为美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)2014年发布海图数据,比例尺为1:20000,投影方式为墨卡托投影。瓦胡岛与谢米亚岛水深控制点与检查点数量分布如表1所示,研究区水深点分布如图1所示。

2.1.2 浑浊水体区域

辽东浅滩位于渤海中浅滩东北部、辽东湾南部,以渤海海峡的老铁山水道为中心,有6根放射状的沙

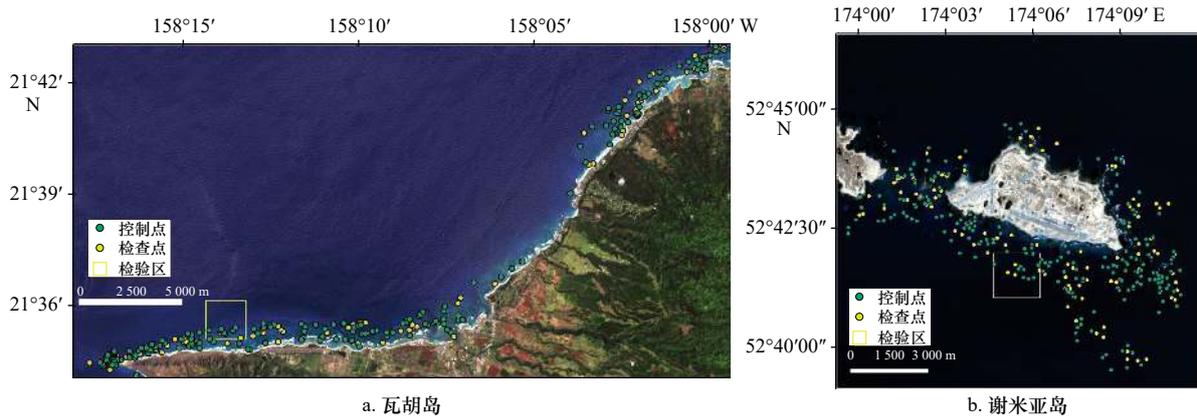


图1 清洁水体遥感影像与水深点分布

Fig. 1 Remote sensing image of clean water and distribution of water depth points

表1 清洁水体水深点数量分布

Table 1 Number distribution of water depth points in clean water

水深点	研究区	整体	0~5 m	5~10 m	10~15 m	15~20 m
控制点	瓦胡岛	183	48	51	47	37
	谢米亚岛	202	44	54	51	53
检查点	瓦胡岛	89	22	29	24	14
	谢米亚岛	93	18	23	29	23

脊, 呈现向辽东湾散开, 向渤海聚拢的扇形分布。该区域受到沙脊影响, 海底地形较为复杂, 沙脊区水深为 12~35 m, 沙脊间距为 7.0~16.7 km, 基槽高差为 6.8~21.9 m, 沙脊脊部水深由南北两侧向沙脊中部变浅, 南侧水深比北侧深, 而沙脊间沟槽南侧水深比北侧浅^[7]。槟城位于马来西亚半岛西北部, 首府乔治市是重要的港口城市, 西隔马六甲海峡与印度苏门答腊

岛相对, 受潮汐与两边宽中间窄的地形影响, 槟城海峡南北海道多被泥沙冲刷, 导致水体浑浊, 研究区影像如图 2 所示。

辽东浅滩与槟城海峡遥感影像成像时间分别为 2015 年 3 月 10 日 02:35(UTC) 与 2014 年 1 月 26 日 03:35(UTC), 两幅影像研究区上空无云满足试验要求。辽东浅滩参考水深值为大连港至长咀子海图数据, 比例尺为 1:150 000, 海图所选用的投影方式为墨卡托投影, 高程基准为 1985 国家高程基准。槟城海域海图比例尺为 1:200 000, 制作时间为 2001 年。辽东浅滩与槟城海域水深检查点与控制点数量分布如表 2 所示。

2.2 数据预处理

2.2.1 辐射定标

原始 Landsat-8 影像灰度值(DN 值)是没有量纲的数值, 将其转换为绝对辐亮度才可以进行定量遥感反演。Landsat-8 辐亮度转换公式为

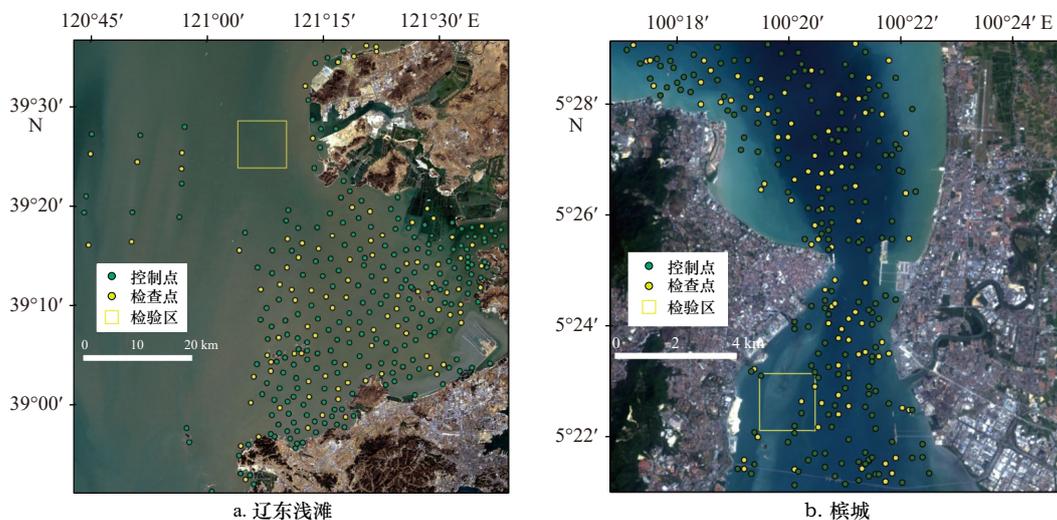


图2 浑浊水体遥感影像与水深点分布

Fig. 2 Remote sensing image of turbid water and distribution of water depth points

表2 浑浊水体水深点数量分布

Table 2 Number distribution of water depth points in turbid water

水深点	研究区	整体	0~5 m	5~10 m	10~15 m	15~20 m
控制点	辽东浅滩	217	50	74	56	37
	槟城	178	50	56	52	20
检查点	辽东浅滩	95	18	31	27	19
	槟城	88	19	27	24	18

$$L_i = DN \times \text{gain}_i + \text{offset}_i, \quad (1)$$

式中, L_i 为波段的辐亮度值; gain_i 为波段增益系数; offset_i 为波段偏置系数。其中增益系数与偏置系数均可从影像头文件获取。

2.2.2 潮汐改正

实测水深采集时的潮高数据与遥感影像获取时的潮高数据并不相同,为使水深反演结果更加精确,需对实测水深数据进行潮汐改正。其原理为某时刻水深值等于实测值加上该时刻潮高。查阅网站获知瓦胡岛遥感影像获取时刻停潮,谢米亚岛影像获取时刻潮高为 1.5 m; 辽东浅滩该时遥感影像获取时刻潮高为 0.8 m, 槟城海域影像获取时刻潮高为 0.9 m。

3 模型与方法

3.1 气溶胶模式

传感器所接收到的信号主要受气体分子和气溶胶影响,虽然气体分子的贡献得到了很好的考虑,但由于很难准确估计大气颗粒物的浓度和类型,使得气溶胶贡献在大气校正中产生了很大的不确定性^[18-19]。国际气象学和大气物理学协会(International Association of Meteorology and Atmospheric Physics, IAMAP)定义了气溶胶4种基本粒子类型:水溶性粒子、类尘埃、海洋性粒子与烟尘性粒子^[20]。基于4种基本粒子体积比将气溶胶类型进行分类,如表3所示。本研究范围包含近岸水体,水体上空气溶胶特性复杂多变,

表3 气溶胶模式4种基本粒子体积比

Table 3 Volume ratio of four basic particles in aerosol model

类型	水溶性粒子	类尘埃	海洋性粒子	烟尘性粒子
大陆型	0.29	0.70	-	0.01
海洋型	0.05	-	0.95	-
城市型	0.61	0.17	-	0.22

注: - 代表没有该类型的物质。

无论是通用的辐射传输模型还是基于图像自身的大气校正算法都需要合理地假定气溶胶模式,一般主要选取大陆型、海洋型和城市型3种气溶胶模式。

3.2 大气校正模型

3.2.1 6S模型

6S模型是由美国马里兰大学 Eric Vermote 对 5S 海洋资源环境遥感信息处理业务应用示范系统高分专项(41-Y30F07-9001-20/22)模型进行改进得到的,6S模型考虑了新的气体吸收分子(CH_4 、 N_2O 、 CO)、非均一地面以及双向反射率问题,其中瑞利散射和气溶胶散射效应的计算精度已经通过逐次散射算法(Successive Order of Scattering, SOS)得到提高,用于光谱积分的步长(分辨率)已经提高到了 2.5 nm^[21-22]。模型提供了多种气溶胶模式,分别为大陆型、海洋型、城市型、沙漠型、生物燃烧型与平流层型6种。本研究选取大陆型、海洋型与城市型3种进行试验。

模型根据卫星接收的表观反射率 R^* 得到地物反射率 R ,公式为

$$R = \frac{R^*(\theta_s, \theta_v, \phi) - R_a(\theta_s, \theta_v, \phi)}{T^\uparrow T^\downarrow + S \left[\frac{R^*(\theta_s, \theta_v, \phi) - R_a(\theta_s, \theta_v, \phi)}{t_g} \right]}, \quad (2)$$

式中, θ_s 为太阳天顶角; θ_v 为传感器天顶角; ϕ 为相对方位角; t_g 为气体吸收透过率; R_a 为大气的路径辐射项等效反射率; T^\uparrow 、 T^\downarrow 和分别为上行与下行大气透过率; S 为球面反照率。

3.2.2 FLAASH模型

FLAASH模型利用MORTAN4+模型对辐射定标后的影像进行校正,它是为可见光至短波红外光谱区的高分辨率成像应用而创建的一种蚁群算法^[23]。FLAASH大气校正假设在太阳波谱范围内地表为均朗伯体^[24],传感器获取的单个像元辐射亮度值满足公式:

$$L^* = \frac{A\rho}{1-\rho_c S} + \frac{B\rho_c}{1-\rho_c S} L_a^*, \quad (3)$$

式中, L^* 为传感器接收到的总辐射; A 、 B 为计算系数; ρ 为表面反射率; ρ_c 为像元与周围环境的平均表面反射率; L_a^* 为大气后向散射系数; S 为大气半球反射率。其中, A 、 B 和 L_a^* 是由MODTRAN4+模型计算得到的,并且 A 、 B 只与观测时传感器及大气状态有关。模型共包括4种气溶胶模式,本文选用海洋型与城市型两种进行试验。

3.2.3 ACOLITE模型

ACOLITE模型是针对Landsat5、Landsat7、Landsat8和Sentinel-2A、Sentinel-2B研究开发的模型,它为沿海和内陆水体提供了简单、快速的大气校正处理方

法^[18, 25]。ACOLITE 模型消除了分子和气溶胶成分在水体中产生的散射效应, 其中瑞利散射使用 6SV (6S Vector) 模型中的查找表进行校正, 气溶胶散射则是基于清水的近红外波段 (842 nm、865 nm) 以及中等浑浊水体的短波红外波段 (1 610 nm、2 130 nm) 估算得到的^[17-18, 24, 26]。ACOLITE 模型提供了 26 种参数类型, 其中针对水体进行大气校正的参数共有 10 种, 本试验采用的参数为水像元的遥感反射率。

3.2.4 QUAC 模型

QUAC 是针对多光谱与高光谱影像的大气校正模型, 它支持的波谱范围为 0.4~2.5 μm , 模型即使在传感器没有适当的辐射或波长校正的情况下也可以得到相对精确的反射光谱, 模型计算不涉及第一辐射原理, 因此比基于物理方法的大气校正模型计算速度快, 在很大程度上适合于实时应用^[27]。

3.3 水深反演模型

本文选取 Lyzenga 等^[28]提出的对数线性模型进行水深 (Z) 反演, 公式为

$$Z = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \ln [L(\lambda_i) - L_{\infty}(\lambda_i)], \quad (4)$$

式中, a_0 、 a_i 为常数 ($i=1, \dots, N$); N 为光谱波段数; $L(\lambda_i)$ 为 i 波段辐亮度值; $L_{\infty}(\lambda_i)$ 为 i 波段深水处辐亮度值。文中采用可见光与近红外波段的不同组合进行水深反演。

4 结果与分析

4.1 大气校正结果分析

校正得到的离水辐亮度或者遥感反射率因辐射传输模型、输入参数与研究区底质类型的不同产生差异, 校正模型参数见表 4, 本文波长 550 nm 处光学厚度由 ACOLITE 模型获得。

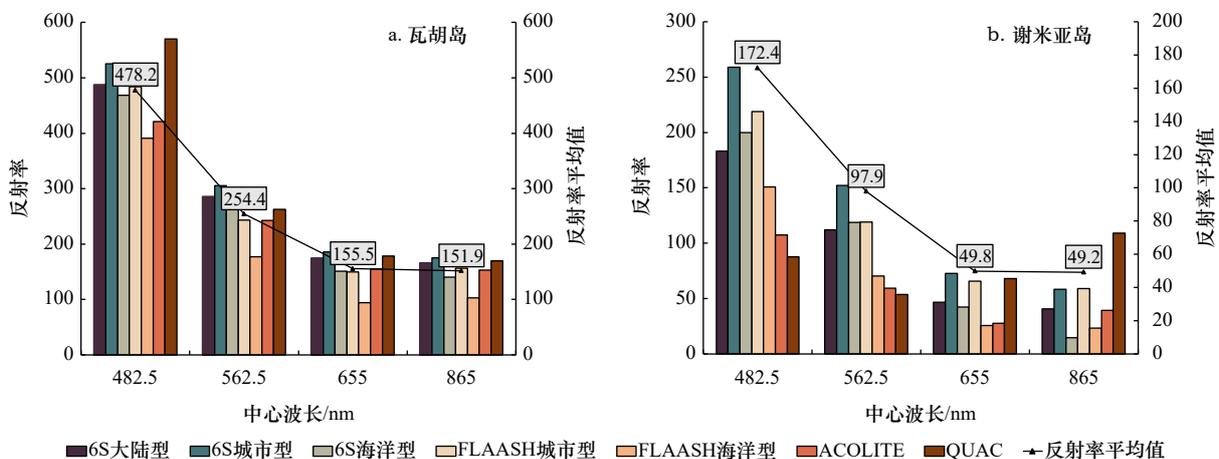


图3 清洁水体4个波段校正结果

Fig. 3 Clean water four bands atmospheric correction results

表4 大气校正参数

Table 4 Atmospheric correction parameters

研究区	大气模式	波长550 nm光学厚度	平均高程/km
瓦胡岛	热带	0.078	0.07
谢米亚岛	中纬度夏季	0.185	0.00
辽东浅滩	中纬度夏季	0.078	0.01
槟城	热带	0.238	0.05

综合考虑水深反演范围以及研究区形状等因素, 从两类研究区中随机选取检验区, 结果如图 1 与图 2 所示。绘制检验区反射率均值柱状图, 并计算不同校正结果平均值 (Mean)、标准差 (Standard Deviation, SD) 与变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 3 方面对不同大气校正模型得到的遥感反射率结果进行分析 (图示结果为实际反射率的 10 000 倍)。Mean、SD 与 CV 公式分别为

$$\text{Mean} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (5)$$

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}})^2}{n}}, \quad (6)$$

$$\text{CV} = \frac{\text{SD}}{x_{\text{mean}}}, \quad (7)$$

式中, x_i 为第 i 种校正结果波段反射率; x_{mean} 为同一波段 n 种校正结果反射率均值。

4.1.1 清洁水体

计算各校正模型在清洁水体检验区可见光至近红外波段得到的反射率及其均值, 见图 3。两个研究区在可见光波段反射率均在蓝波段达到最高, 并且随着波长增加反射率逐渐降低; 瓦胡岛研究区各波段反

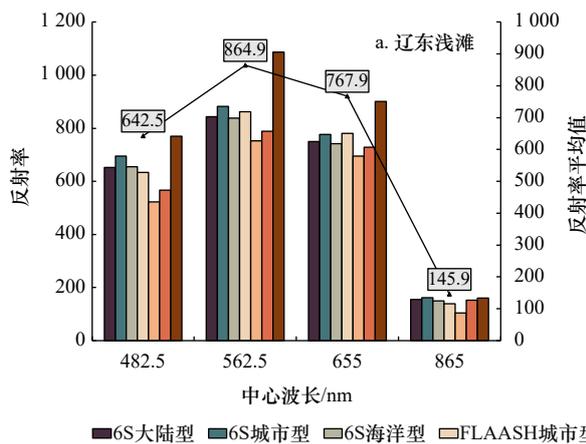
表 5 清洁水体校正结果标准差 (SD) 与变异系数 (CV)

Table 5 Standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV) of atmospheric correction results for clean water

中心波长/nm	瓦胡岛研究区		谢米亚岛研究区	
	SD	CV/10 ⁻³	SD	CV/10 ⁻³
482.5	55.81	116.7	56.53	328.0
562.5	37.80	148.6	34.31	350.3
655	28.41	182.7	17.86	358.5
865	22.73	149.7	28.80	585.1

射率在 FLAASH 海洋型气溶胶模型处最小; 谢米亚岛研究区因模型与参数不同导致的校正结果相互关系与瓦胡岛存在差异, 为进一步判断模型之间差异, 计算四波段 SD 与 CV, 见表 5。

清洁水体内两个检验区在可见光范围 SD 与



CV 之间呈现负相关, 即随着波长增加, 各校正结果 SD 逐渐减小, 但因模型与参数不同引起校正结果之间的差异逐渐增大。瓦胡岛与谢米亚岛研究区底质类型不同, 瓦胡岛检验区多为珊瑚礁, 谢米亚岛周围岩石较多, QUAC 模型因两个研究区底质不同导致校正结果存在明显差异。

4.1.2 浑浊水体

计算各校正模型在浑浊水体检验区可见光至近红外波段得到的反射率, 并计算 7 种模型在同一波段反射率均值, 见图 4。两个研究区四波段反射率均在绿波段达到最高; 6S 与 FLAASH 海洋型气溶胶模型在浑浊水体研究区反射率均小于相同校正模型下其他气溶胶参数得到的结果; 研究区内 6S、FLAASH 海洋型气溶胶模型与 QUAC 模型得到的反射率结果值较高。为进一步判断模型之间差异, 计算四波段 SD 与 CV, 见表 6。

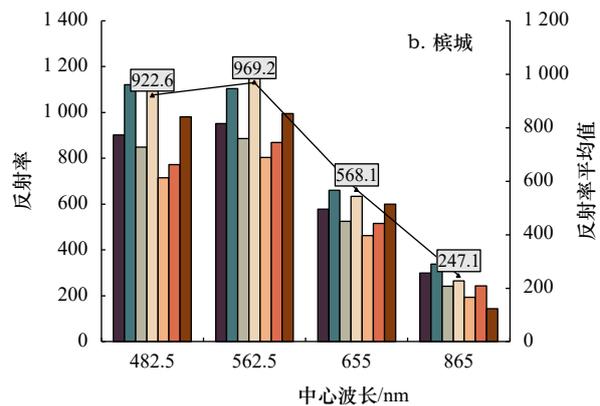


图 4 浑浊水体 4 个波段校正结果

Fig. 4 Turbid water four bands atmospheric correction results

表 6 浑浊水体校正结果标准差 (SD) 与变异系数 (CV)

Table 6 Standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV) of atmospheric correction results for turbid water

中心波长/nm	辽东浅滩研究区		槟城研究区	
	SD	CV/10 ⁻³	SD	CV/10 ⁻³
482.5	74.96	116.7	147.35	159.7
562.5	99.19	114.7	122.16	126.0
655	60.56	78.9	64.91	114.3
865	18.72	128.3	59.80	242.0

辽东浅滩与槟城海峡检验区底质多为砂质, 水体成分相似, 由表 6 可知, 检验区内 SD“谷”值与 CV“峰”值均出现在近红外波段, 可知浑浊水体研究

区近红外波段反射率受校正模型影响较大。可见光波段 CV 值随着波长的增加逐渐减小, 表明在该波长区域反射率受校正模型及其参数变化的影响逐渐减小, 校正结果稳定性逐渐增强。

传感器接收到的反射率信息主要包括水面反射光、水体悬浮物反射光、水底反射光和天空反射光, 大气校正模型主要消除由于天空光对辐射传输带来的影响, 但是因研究区底质类型与水体组分差异导致水体对辐射的吸收具有波段选择性, 从而导致校正结果存在差异。分析图 3 和图 4、表 5 和表 6 可知, 清洁水体研究区不同大气校正模型结果差异受水体底质影响较大, 即模型结果之间波动性明显, 如谢米亚岛研究区; 但浑浊水体研究区由于水体成分复杂多变, 使得不同辐射传输模型得到的校正结果相关性保

持一致。两类水体校正结果 CV 在可见光范围变化趋势相反, 清洁水体研究区随着波长增大, CV 逐渐增大, 而浑浊水体 CV 峰值则出现在蓝波段处。

两类水体反射率峰值分别出现在蓝波段与绿波段处, 以瓦胡岛蓝波段与辽东浅滩绿波段为例绘制反射率分布图, 如图 5 与图 6 所示。ACOLITE 模型是

基于短波红外“暗像元”针对内陆与沿岸水体提出的大气校正模型, 导致在对清洁水体进行试验时产生过校正现象; 在浑浊水体研究区该模型得到的结果较为缓和, 且出现了双峰值的现象, 见图 6f。整体来看, 除 ACOLITE 模型外, 其余模型校正结果在检验区反射率分布相似, 受研究区影响较小。

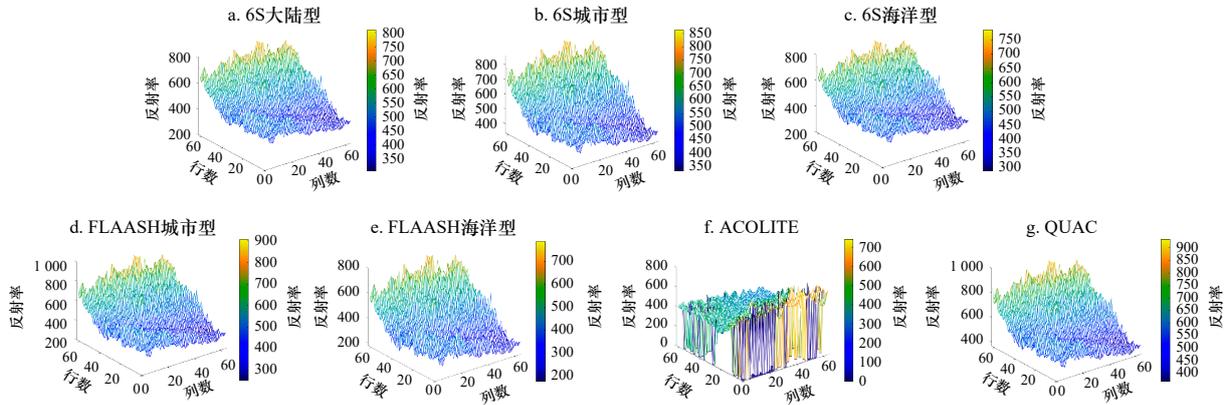


图 5 瓦胡岛检验区蓝波段反射率分布

Fig. 5 Blue-band reflectance distribution in the Oahu Island test area

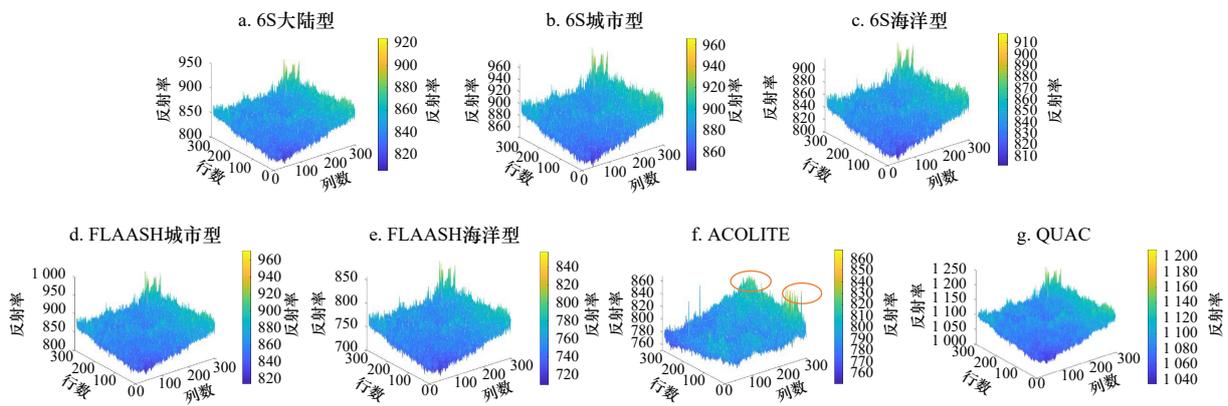


图 6 辽东浅滩检验区绿波段反射率分布

Fig. 6 Green-band reflectance distribution in the Liaodong Shoal test area

4.2 不同波段组合水深反演模型精度评价

本文选取蓝波段(B)、绿波段(G)、红波段(R)与近红外(NIR)4个波段, 组合方式如表 7 所示。以平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 与平均相对

表 7 不同波段组合模型

Table 7 Different band combination model

波段数目	组合方式		
单波段	B	G	R
双波段	B+G	B+R	G+R
三波段	B+G+R		
四波段	B+G+R+NIR		

误差 (Mean Relative Error, MRE) 为评价指标, 对不同波段组合方式得到的水深反演结果进行分析 (表 8), 并计算不同大气校正模型在同一水深反演模型下 MAE 与 MRE 的平均值与标准差, 得到相同波段数目下最佳反演模型 (表 9)。绘制组合折线图 (MAE 与 MRE 走向一致, 故本文将只展示 MRE), 判断水深反演模型的稳定性, 从而选取最佳波段组合方式。计算发现同类水体研究区整体变化一致, 故本文以瓦胡岛与辽东浅滩为例展开详细分析。

4.2.1 清洁水体

绘制瓦胡岛研究区各个组合方式反演结果 MRE 柱状图, 见图 7, 单波段与双波段水深反演模型结果呈现“W”型走向, 之后精度逐渐增高, 即在绿波段与

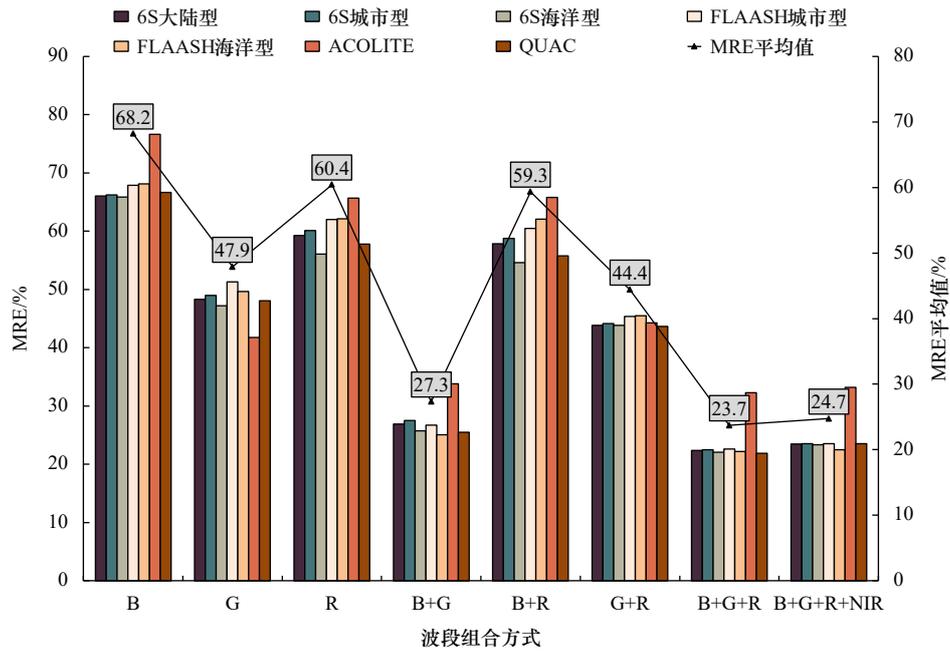


图 7 瓦胡岛不同波段组合模型水深反演结果精度分析

Fig. 7 Accuracy analysis of bathymetric inversion results of different band combination models of Oahu Island

表 8 清洁水体不同波段组合模型水深反演结果精度

Table 8 The accuracy of water depth inversion results of different band combination models for clean water

研究区	模型	MAE平均值/m				MRE平均值/%			
		G	B+G	B+G+R	B+G+R+NIR	G	B+G	B+G+R	B+G+R+NIR
瓦胡岛	6S大陆型	2.50	1.71	1.43	1.47	48.3	26.9	22.4	23.5
	6S城市型	2.52	1.73	1.44	1.47	49.0	27.5	22.5	23.6
	6S海洋型	2.46	1.65	1.43	1.49	47.2	25.7	22.1	23.3
	FLAASH城市型	2.68	1.72	1.41	1.44	51.3	26.7	22.6	23.5
	FLAASH海洋型	2.67	1.71	1.43	1.45	49.7	25.1	22.2	22.5
	ACOLITE	2.28	2.08	1.91	1.91	41.7	33.8	32.3	33.2
	QUAC	2.49	1.66	1.42	1.47	48.1	25.5	21.9	23.5
谢米亚岛	6S大陆型	2.43	2.43	2.47	2.43	50.8	32.4	28.6	28.9
	6S城市型	3.59	2.72	2.49	2.47	50.4	33.4	28.7	29.4
	6S海洋型	3.59	2.72	2.51	2.40	50.6	33.0	29.3	28.7
	FLAASH城市型	3.92	2.92	2.56	2.54	58.4	34.8	29.3	30.4
	FLAASH海洋型	4.10	3.14	2.42	2.42	62.8	38.8	27.7	28.1
	ACOLITE	3.67	2.63	2.32	2.34	52.7	30.8	25.7	26.9
	QUAC	3.79	2.70	2.34	2.36	55.9	32.9	27.9	30.4

注: 本表中展示了精度较好的几种波段组合方式。

蓝+绿波段 MRE 达到“谷”值, 水深反演结果精度在同波段数模型中最好。为判断因异常值对水深反演模型精度的影响, 计算 MAE 与 MRE 的平均值与标准差, 如表 9 所示。

由表 9 可知, 瓦胡岛研究区内单波段与双波段 MRE 均值最低时, SD 均较大, 绿波段反演模型处 MAE 与 MRE 标准差分别为 0.14 m 与 3.0%, 较蓝波段模型分别高出 0.03 m 与 -0.8%。单、双波段水深反演模型整

表9 清洁水体不同波段组合模型水深反演结果均值与标准差

Table 9 Mean and standard deviation of bathymetric inversion results of different band combination models for clean water

研究区	指标		B	G	R	B+G	B+R	G+R	B+G+R	B+G+R+NIR
瓦胡岛	MAE	平均值/m	3.74	2.51	3.67	1.75	3.75	2.34	1.50	1.53
		标准差/m	0.11	0.14	0.12	0.15	0.11	0.07	0.18	0.17
	MRE	平均值/%	68.2	47.9	60.4	27.3	59.3	44.4	23.7	24.7
		标准差/%	3.8	3.0	3.2	3.0	3.8	0.8	3.8	3.8
谢米亚岛	MAE	平均值/m	4.14	3.59	3.91	2.75	4.08	3.60	2.44	2.42
		标准差/m	0.69	0.50	0.62	0.21	0.67	0.49	0.08	0.06
	MRE	平均值/%	70.5	54.5	59.7	33.7	64.3	54.8	28.2	29.0
		标准差/%	2.1	4.4	2.9	2.3	4.5	3.4	1.2	1.2

体 SD 均较大,可知两种类型水深反演模型整体稳定性较差。三波段模型得到的水深反演结果精度最佳,其 MAE 与 MRE 均值为 1.50 m 与 23.7%,较四波段降低了 0.03 m 与 1.0%,SD 与四波段无明显差距。

由表 8 与表 9 可知,谢米亚岛研究区单、双波段 MRE 最小值分别出现在绿、蓝+绿波段处,且三波段水深反演结果精度与四波段接近,两者 MAE 与 MRE 平均值分别相差 0.02 m 与 0.8%,整体与瓦胡岛研究区保持一致。在清洁水体研究区,多波段水深反演模型结果优于单波段,一定程度上波段数目与反演结果精度呈现正相关,但是随着波段数目的增加,精度变化逐渐减小。以瓦胡岛为例,反演模型 MAE 平均值与波段数目呈现负相关,且在三波段处达到最优值,

对应的 MAE 与 MRE 平均值分别为 1.50 m 与 23.7%,较蓝波段分别降低了 2.24 m 与 44.5%,且 MRE 标准差为 3.8%,即不同校正模型对应的反演结果差异明显,故本文对清洁水体研究区将采用三波段水深反演模型开展试验。

4.2.2 浑浊水体

绘制辽东浅滩研究区各个组合方式反演结果 MRE 柱状图(图 8),单波段与双波段水深反演模型结果趋势呈现倒“N”型走向,且水深反演结果精度与模型波段数目呈现正相关。单、双波段水深反演结果整体差异较小,在三波段水深反演模型处明显下降,四波段精度达到最佳,计算各水深反演模型结果标准差,如表 10 所示。

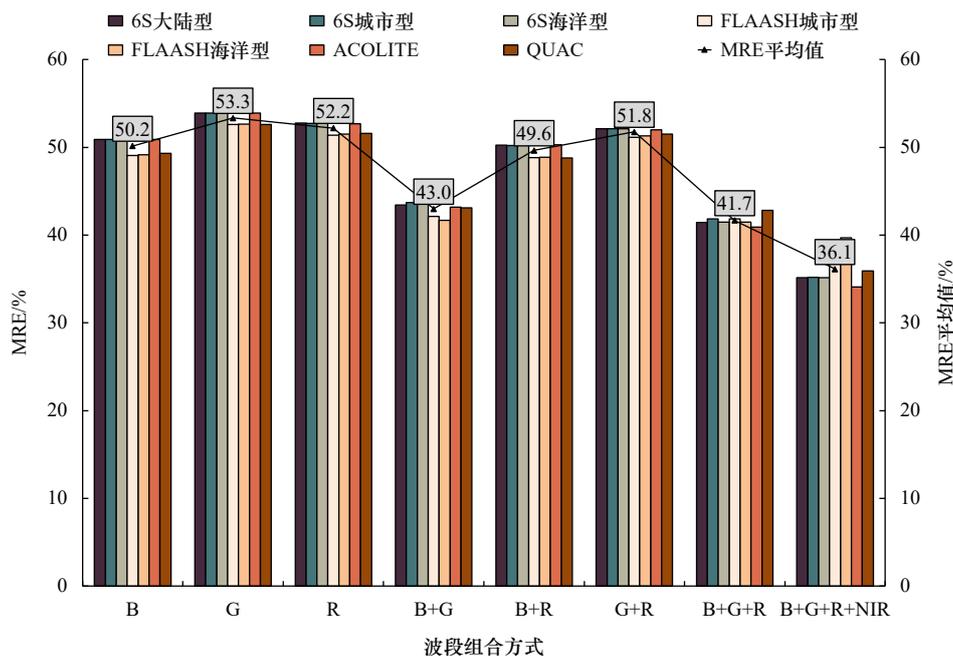


图8 辽东浅滩不同波段组合模型水深反演结果精度分析

Fig. 8 Accuracy analysis of bathymetric inversion results of different band combination models of Liaodong Shao

表 10 浑浊水体不同波段组合模型水深反演结果精度

Table 10 The accuracy of water depth inversion results of different band combination models for turbid water

研究区	模型	MAE/m				MRE/%			
		B	B+G	B+G+R	B+G+R+NIR	B	B+G	B+G+R	B+G+R+NIR
辽东浅滩	6S大陆型	3.83	3.42	3.27	2.81	50.9	43.4	41.4	35.2
	6S城市型	3.83	3.44	3.30	2.82	50.9	43.7	41.8	35.2
	6S海洋型	3.83	3.42	3.27	2.81	50.9	43.7	41.5	35.1
	FLAASH城市型	3.81	3.47	3.41	3.04	49.1	42.1	41.8	37.6
	FLAASH海洋型	3.81	3.45	3.38	3.20	49.2	41.7	41.5	39.7
	ACOLITE	3.82	3.40	3.26	2.77	50.9	43.2	40.9	34.1
	QUAC	3.81	3.48	3.40	2.94	49.3	43.1	42.8	35.9
槟城	6S大陆型	3.23	3.07	3.06	2.94	41.2	38.2	37.8	36.1
	6S城市型	3.22	3.07	3.05	2.94	41.2	38.2	37.7	36.0
	6S海洋型	3.23	3.06	3.05	2.94	41.2	38.1	37.6	35.9
	FLAASH城市型	3.21	3.12	3.12	3.04	41.3	39.3	39.5	37.4
	FLAASH海洋型	3.22	3.11	3.11	3.03	41.3	39.1	39.2	37.2
	ACOLITE	3.23	3.06	3.04	2.94	41.2	38.2	37.7	36.0
	QUAC	3.25	3.09	3.10	2.92	42.0	39.2	39.4	36.2

注: 本表只展示了精度较好的几种波段组合方式。

由表 11 可知, 辽东浅滩研究区除四波段水深反演模型外, 其他模型反演结果 MRE 平均值高于 40.0%, SD 小于 1.0%, 表明大气校正模型差异对该研究区水深反演结果产生的差异较小。随着水深反演模型波段数目的增多, 因校正模型产生的差异逐渐明显, 四波段反演模型 MAE、MRE 标准差均达到峰值, 分别为 0.16 m 与 1.9%, 由图 8 可知, 该模型误差来源主要为 FLAASH 校正模型对应的水深反演结果。

由表 10 与表 11 可知, 槟城研究区反演结果精度

在四波段模型处达到最好, 其 MAE 与 MRE 均值分别为 2.96 m 与 36.4%, 较三波段模型分别降低了 0.12 m 与 2.0%, 研究区整体精度走向与辽东浅滩一致。浑浊水体多波段水深反演模型结果优于单波段, 波段数目与反演结果精度呈现正相关, 详见表 11。以辽东浅滩为例, 相邻波段数最佳反演模型 MRE 平均值差距分别为 7.2%、1.3% 与 5.6%, 且精度逐渐提高。四波段模型反演结果 MAE 与 MRE 平均值分别为 2.91 m 与 36.1%, MRE 标准差为 1.9%, 反演结果精度因校正

表 11 浑浊水体不同波段组合模型水深反演结果均值与标准差

Table 11 Mean and standard deviation of bathymetric inversion results of different band combination models for turbid water

研究区	指标	B	G	R	B+G	B+R	G+R	B+G+R	B+G+R+NIR	
辽东浅滩	MAE	平均值/m	3.82	3.97	3.91	3.44	3.79	3.89	3.33	2.91
		标准差/m	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	0.07	0.16
	MRE	平均值/%	50.2	53.3	52.2	43.0	49.6	51.8	41.7	36.1
		标准差/%	0.9	0.7	0.7	0.8	0.8	0.4	0.6	1.9
槟城	MAE	平均值/m	3.27	3.23	3.58	3.24	3.23	3.08	3.08	2.96
		标准差/m	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	0.02	0.03	0.04
	MRE	平均值/%	43.8	41.3	50.7	42.1	43.3	38.6	38.4	36.4
		标准差/%	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.5	0.8	0.6

模型不同产生明显差异,故本研究对浑浊水体研究区将采用四波段水深反演模型开展试验。

由表 8 至表 11 可知,水深反演模型受水体组分影响,清洁水体研究区最优波段为绿波段,浑浊水体为蓝、绿波段;双波段最优组合模型在浑浊水体研究区分别为蓝+绿与绿+红;整体来看,清洁水体研究区三波段精度较好;浑浊水体四波段模型反演结果最好,辽东浅滩研究区 MRE 均值较三波段降低了 5.6%。

4.3 整体水深反演精度分析

对不同大气校正模型结果进行水深反演,绘制检查点反演结果与真实值之间的散点图(以瓦胡岛与辽东浅滩为例),计算拟合直线(实线)比例系数,与 1:1

直线(虚线)进行对比分析。并计算检查点 MAE 与 MRE。

4.3.1 清洁水体

绘制瓦胡岛不同大气校正模型对应的参考水深值与反演结果之间的散点图,如图 9 所示。7 种大气校正模型对应的水深反演结果与参考水深值之间拟合系数均不小于 0.97,整体拟合效果较好。由图 9b 和图 9d 可知,两种模型对应的水深反演结果精度一致,且都是由城市型气溶胶校正模型得到的,MRE 均为 22.5%;由图 9c 和图 9e 可知,海洋型气溶胶校正模型得到的反演结果精度较高,MRE 分别为 22.1% 与 22.2%。ACOLITE 模型对应的反演结果精度最差,MAE 与 MRE 分别为 1.91 m 与 32.3%,较 6S 海洋型水深结果精度降低了 10.2%。

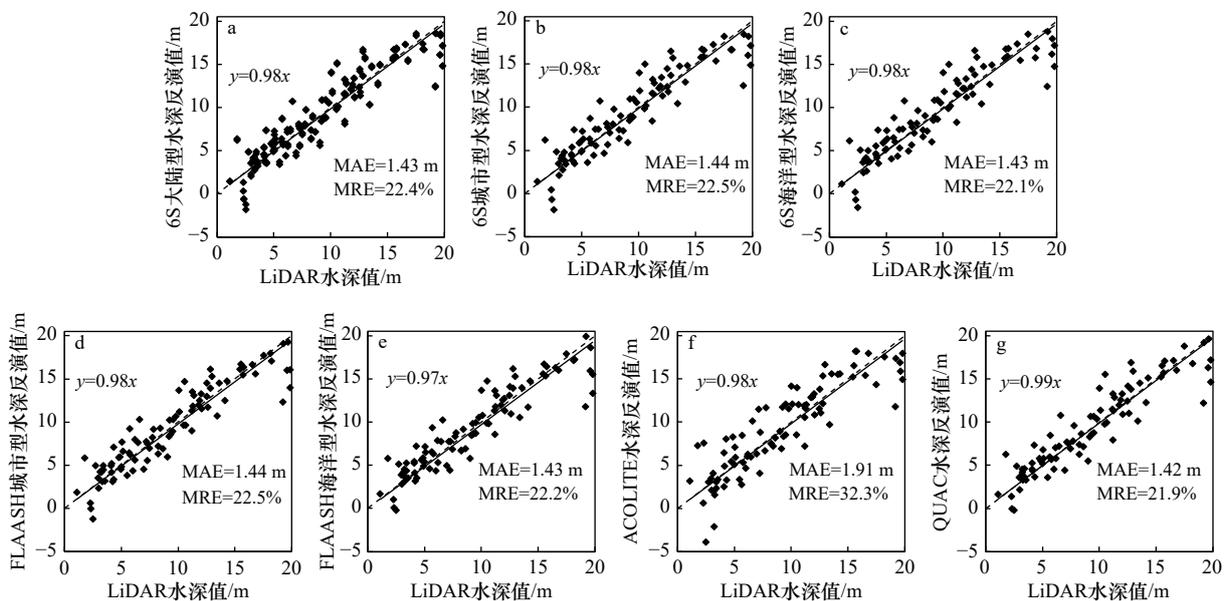


图 9 瓦胡岛研究区不同大气校正模型反演水深值与参考水深值散点图

Fig. 9 Scatter plots of bathymetry and reference bathymetry for different atmospheric correction models for Oahu Island

由表 8 可知,清洁水体水深反演结果受校正模型影响较大;瓦胡岛研究区不同校正模型对应的反演结果精度相差较小,且因气溶胶参数不同导致的水深反演结果差异可以忽略;但是在谢米亚岛研究区,FLAASH 模型因气溶胶不同导致的水深精度差异明显,海洋型气溶胶反演结果比城市型精度提高了 0.14 m 与 1.6%。ACOLITE 模型在清洁水体研究区内波动性明显,瓦胡岛研究区反演结果精度最差,MRE 为 32.3%,谢米亚岛 MRE 为 25.7%,较 FLAASH 模型降低了 3.6%。

4.3.2 浑浊水体

绘制辽东浅滩研究区不同大气校正模型对应的实测水深值与反演水深值之间的散点图,并计算 MAE 与 MRE,如图 10 所示。发现 7 种水深反演结果与实测水深值拟合系数保持在 0.85 ± 0.02 ,在 5~10 m

水深段拟合效果较好,靠近 1:1 直线。由图 10a 至图 10c 可知,当校正模型为 6S 时,改变气溶胶参数对整体反演结果精度影响较小。相比 6S 模型,FLAASH 模型因参数改变导致的水深结果精度变化明显,当为海洋型气溶胶时,精度较差,其 MRE 为 39.7%,较城市型校正结果精度下降了 2.1%。该研究区精度最佳的反演结果由 ACOLITE 模型校正结果产生,其 MAE 与 MRE 分别为 2.77 m 与 34.1%。

由表 10 可知,浑浊水体研究区 FLAASH 校正模型对应的水深反演结果最差,辽东浅滩与滨城研究区水深反演结果中最大的 MRE 分别为 39.7% 与 37.4%,较 ACOLITE 模型水深反演结果分别高出了 5.6% 与 1.4%。研究区内 6S 与 ACOLITE 模型对应的水深反演结果精度稳定且相近,在滨城研究区两者 MAE 为

2.94 m, MRE差值保持在 0.02% 及以内。

4.4 分段水深反演精度分析

为进一步探讨不同大气校正模型对水深反演的影响,以 5 m、10 m 和 15 m 为界,计算不同水深段内检查点的 MAE 与 MRE,开展分段水深反演精度

分析。

4.4.1 清洁水体

计算清洁水体研究区不同大气校正模型各水深段反演结果 MAE 与 MRE,见表 12。瓦胡岛研究区反演结果精度在 0~20 m 水深段逐渐提高;6S 模型 3 种

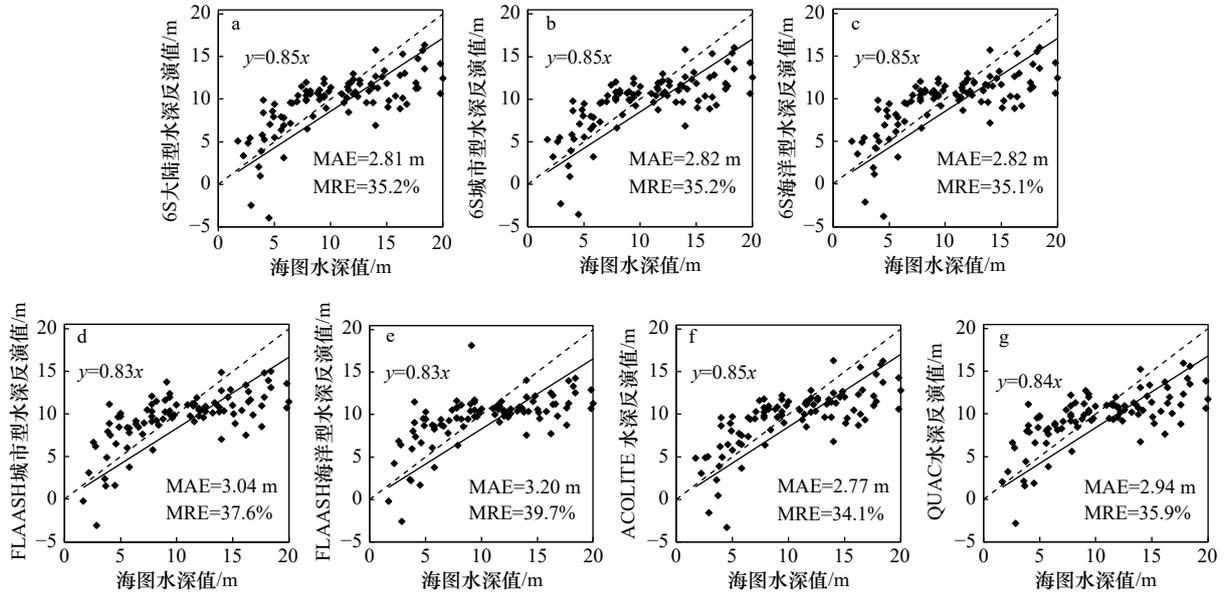


图 10 辽东浅滩研究区不同大气校正模型反演水深值与参考水深值散点图

Fig. 10 Scatter plots of bathymetry and reference bathymetry for different atmospheric correction models for Liaodong Shoal

表 12 清洁水体分段水深精度评价

Table 12 Accuracy evaluation of segmented depth of clean water

研究区	水深段/m	指标	6S大陆型	6S城市型	6S海洋型	FLAASH城市型	FLAASH海洋型	ACOLITE	QUAC
瓦胡岛	0~5	MAE/m	1.16	1.17	1.15	1.18	1.20	1.93	1.20
		MRE/%	44.6	44.7	44.0	45.2	45.0	74.3	44.7
	5~10	MAE/m	1.13	1.15	1.13	1.15	1.11	1.65	1.20
		MRE/%	16.2	16.4	16.1	16.8	16.2	23.3	17.0
	10~15	MAE/m	1.51	1.52	1.53	1.42	1.41	1.82	1.67
		MRE/%	13.0	13.0	13.1	12.1	12.0	15.4	14.2
15~20	MAE/m	1.83	1.84	1.81	1.71	1.85	2.53	1.77	
	MRE/%	9.8	9.9	9.7	9.1	10.0	13.9	9.5	
谢米亚岛	0~5	MAE/m	2.14	2.21	2.19	2.28	1.91	1.74	1.72
		MRE/%	62.2	63.1	65.1	64.7	62.1	49.9	59.8
	5~10	MAE/m	1.71	1.69	1.69	1.64	1.39	1.67	1.61
		MRE/%	24.0	23.9	23.9	22.7	19.0	23.3	22.9
	10~15	MAE/m	1.91	1.86	1.94	2.00	1.93	1.91	1.90
		MRE/%	14.7	14.2	14.9	15.3	14.8	14.8	14.8
15~20	MAE/m	4.19	4.29	4.28	4.43	4.46	3.94	4.10	
	MRE/%	24.3	24.9	24.9	25.7	25.8	22.9	24.4	

结果在 0~10 m 保持较好的精度值,且 3 种结果精度相近;ACOLITE 模型得到的水深反演结果精度在各个水深段均为最低,浅水区较为显著,MRE 为 74.3%,精度较 6S 海洋型降低了 30.3%。FLAASH 海洋型校正模型在 5~10 m 水深段得到的水深反演结果精度最好。QUAC 模型在 4 个水深段反演结果精度与其他模型差距逐渐缩短,且在 15~20 m 水深段 MRE 为 9.5%。

谢米亚岛 0~15 m 水深段反演结果精度随着水深增加而增加,在 10~15 m 处达到最优;在浅水区 ACOLITE 模型对应的水深反演结果精度最好,MRE 较 6S 海洋型结果降低了 15.2%;5~10 m 与 10~15 m 最佳反演精度分别对应 FLAASH 与 6S 模型。整体来看,ACOLITE 与 QUAC 模型在 5~15 m 水深段精度相近且较好,两者 MRE 差值保持在 0.1%。

清洁水体研究区在各个水深段精度变化存在差异,瓦胡岛研究区随着水体深度增加精度逐渐升高,且相同水深段因模型参数不同导致的水深反演结果

精度差异微弱;谢米亚岛研究区在 10~15 m 处水深结果精度最佳,且受校正模型参数影响敏感,以 FLAASH 模型为例,5~10 m 水深段城市型气溶胶对应结果 MRE 较海洋型降低了 3.7%。

4.4.2 浑浊水体

计算浑浊水体研究区不同大气校正模型各水深段反演结果 MAE 与 MRE,见表 13。辽东浅滩研究区反演结果在 0~15 m 水深段精度逐渐提高,在 10~15 m 达到最佳,15~20 m 逐渐下降。ACOLITE 模型在各个水深段反演结果精度均较好,0~5 m 处优越性明显,其 MAE 与 MRE 分别为 2.98 m 与 82.5%。对比发现,相同大气校正模型因气溶胶参数不同导致的水深反演结果精度变化主要发生在 0~10 m 研究区,且城市型气溶胶对应的反演结果精度较好;如 FLAASH 模型,海洋型气溶胶 0~5 m 水深反演结果 MAE 与 MRE 分别为 3.43 m 与 99.0%,与城市型气溶胶相差 0.20 m 与 7.9%。

表 13 浑浊水体分段水深精度

Table 13 Accuracy of segmented depth of turbid water

研究区	水深段/m	指标	6S大陆型	6S城市型	6S海洋型	FLAASH城市型	FLAASH海洋型	ACOLITE	QUAC
辽东浅滩	0~5	MAE/m	3.09	3.07	3.16	3.23	3.43	2.98	3.37
		MRE/%	86.4	85.8	88.5	91.1	99.0	82.5	89.1
	5~10	MAE/m	2.04	2.03	2.13	2.07	2.10	1.93	1.88
		MRE/%	27.3	27.3	28.6	27.6	28.6	25.7	25.2
	10~15	MAE/m	1.80	1.78	1.69	1.94	2.04	1.87	2.02
		MRE/%	13.5	13.4	12.7	14.6	15.4	14.1	15.3
15~20	MAE/m	5.29	5.32	5.20	5.35	5.72	5.22	5.56	
	MRE/%	30.6	30.7	30.0	30.8	32.7	30.1	32.0	
槟城	0~5	MAE/m	1.76	1.75	1.76	1.72	1.73	1.75	1.80
		MRE/%	65.1	64.3	64.6	66.3	66.3	64.5	65.7
	5~10	MAE/m	2.04	2.05	2.05	2.20	2.15	2.05	2.12
		MRE/%	30.7	30.9	30.8	32.9	32.1	30.9	32.1
	10~15	MAE/m	2.26	2.25	2.25	2.39	2.40	2.25	2.13
		MRE/%	18.4	18.3	18.4	19.6	19.7	18.3	17.3
15~20	MAE/m	6.47	6.45	6.45	6.54	6.56	6.44	6.37	
	MRE/%	37.2	37.1	37.1	37.6	37.7	37.0	36.6	

槟城研究区反演结果在 0~15 m 水深段精度逐渐提高,在 10~15 m 达到最佳,15~20 m 逐渐下降,与辽东浅滩研究区相同。FLAASH 模型对应的反演结果在 4 个水深段与参考水深值之间的偏差明显。6S 城市型校正模型与 ACOLITE 模型反演结果在各

个水深段精度均相近,两者 MAE 与 MRE 差值分别保持在 0.01 m 与 0.1%。

两个浑浊水体研究区内 ACOLITE 校正模型对应的反演结果精度均有一定的优越性;FLAASH 校正模型均为最差。6S 与 FLAASH 校正模型在浑浊水体研

究区内因气溶胶不同导致的水深反演结果精度变化较清洁水体明显,且海洋型气溶胶模式结果精度最差。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文分别以瓦胡岛西北侧与谢米亚岛为清洁水体研究区,辽东浅滩与槟城海域为浑浊水体研究区,选用主流的 6S、FLAASH、ACOLITE 与 QUAC 大气校正模型对 Landsat-8 OLI 影像进行对比试验,其中 6S 与 FLAASH 两种模型选取了不同气溶胶模式,最终采用 8 种波段组合方式进行水深反演。研究从不同维度探讨了几种大气校正模型对水深反演的影响,结果如下:

(1) 尽管 4 种不同大气校正模型之间存在差异,但均可在一定程度上消除大气对水体信号的影响;受水体组分与模型参数影响导致最终校正结果存在差异,且采用不同气溶胶模式得到的大气校正结果不同,这一现象在浑浊水体研究区表现相对明显。因此气溶胶现场测量是有必要的。

(2) 受水体组分影响导致校正结果产生差异,在可见光波段差异明显。清洁水体研究区蓝波段反射率最大且受校正模型影响较小,即 CV 最小;浑浊水体反射率峰值出现在绿波段。整体上,清洁水体研究区随着波长增大, CV 逐渐增大;浑浊水体则与之相反。

(3) 本文选取可见光与近红外波段进行水深反演,采用 8 种波段组合方式,单波段水深反演模型精度与稳定性受校正模型与水体浑浊程度影响较大;在一定程度上水深反演精度随着模型波段数目的增加而提升,浑浊水体研究区四波段模型精度明显高于三波段;但波段数目与反演精度之间不存在严格的相关性,清洁水体研究区三波段与四波段组合模型水深反演结果精度相近。

(4) 整体来看,6S 大气校正模型鲁棒性较强,该模型因研究区水体组分发生变化导致对应的水深反演结果与其余模型相比波动较小,ACOLITE 模型在瓦胡岛得到反演精度最差, MRE 为 33.2%,在辽东浅滩 MRE 仅为 34.1%,反演结果受水体组分影响显著;但 6S 模型 3 种反演结果与参考水深值整体拟合系数在瓦胡岛均不小于 0.98,辽东浅滩大于 0.85。对比两类水体,清洁水体水深反演结果精度主要受研究区影响,如 ACOLITE 模型在谢米亚岛对应的水深反演结果 MRE 较 6S 模型降低了 3.6%,浑浊水体因气溶胶参数不同导致的水深反演精度变化明显,如辽东浅滩 0~10 m 水深段,城市型气溶胶对应的水深结果精度较

海洋型有明显提升,FLAASH 城市型模型在 0~5 m 水深范围对应的反演结果 MRE 较海洋型高出 7.9%。

5.2 讨论

水深遥感的一个关键步骤是去除大气影响获得离水辐射信号,大气影响因素中气溶胶时空变化较大,尤其近岸水体,是大气校正的主要难题。许海蓬等^[13]、张彦彦等^[14]利用 6S、FLAASH 与 DOS 模型对 WorldView-2 影像进行大气校正,6S 与 FLAASH 模型统一选取海洋型气溶胶模式进行试验,探讨不同大气校正模型对南海岛礁水体水深反演的影响。本文不仅选取 6S、FLAASH 模型,而且增加了 ACOLITE 与 QUAC 两种模型,同时对 6S 与 FLAASH 还选取 2~3 种气溶胶模式;为探讨水体组分与底质多样性对大气校正的影响,本文不限于岛礁清洁水体辽东浅滩西北侧,还考虑了底质类型复杂的谢米亚岛作为清洁水体研究区,并将近岸辽东湾与槟城海峡区域作为浑浊水体研究区进行试验,结果表明:6S 模型表现稳定;不同气溶胶模式对大气校正结果产生的影响不可忽略,且因研究区水体组分与底质变化使得校正结果产生差异。

可见光、近红外波段能够穿透一定深度的水体,获取海底反射信息并经过水体与大气传输进入传感器,因此可见光、近红外波段广泛应用于水深反演。张彦彦等^[14]利用 WorldView-2 影像的 8 个波段共 255 种组合方式对永兴岛周边进行水深反演;本文选取了更为常用的 Landsat 四波段影像数据,考虑了清洁水体与浑浊水体,利用可见光与近红外不同的波段组合方式进行水深反演,结果发现:对于清洁水体,三波段水深反演结果精度最佳,如瓦胡岛 MAE 与 MRE 均值分别为 1.50 m 与 23.7%,浑浊水体水深反演结果精度四波段优于三波段。

采用通用辐射传输模型(MODTRAN 和 6S)进行水体大气校正的关键在于获得较为完备的大气参数。本文进行大气校正时采用的为经验参数,今后的研究可对大气校正模型的参数进行完善。此外,底质是影响水深反演精度的原因之一,如清洁水体谢米亚岛研究区底质类型复杂多变,得到的水深反演结果整体劣于底质相对单一的瓦胡岛研究区。不同反演模型对底质变化的适应性不同,本文仅选用了传统的对数线性组合模型,在接下来的研究中将采取不同水深反演模型进行试验,探讨大气校正模型、水深反演模型与底质类型之间的关系。在进一步的研究中,可以考虑对研究区底质进行分类,将大气校正模型与底质类型进行结合,探讨两者之间的关系,从而使对校正与反演模型的选择更具有针对性。

参考文献:

- [1] 王艳姣,董文杰,张培群,等.水深可见光遥感方法研究进展[J].*海洋通报*,2007,26(5):92-101.
Wang Yanjiao, Dong Wenjie, Zhang Peiqun, et al. Progress in water depth mapping from visible remote sensing data[J]. *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(5): 92-101.
- [2] Renosh P R, Doxaran D, De Keukelaere L, et al. Evaluation of atmospheric correction algorithms for sentinel-2-MSI and sentinel-3-OLCI in highly turbid estuarine waters[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1285.
- [3] Gordon H R. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(10): 1631-1636.
- [4] Gordon H R, Clark D K. Atmospheric effects in the remote sensing of phytoplankton pigments[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1980, 18(3): 299-313.
- [5] Ruddick K G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(6): 897-912.
- [6] 孔金玲,杨晶,孙晓明,等.多光谱遥感影像大气校正与悬沙浓度反演——以曹妃甸近岸海域为例[J].*国土资源遥感*,2016,28(3):130-137.
Kong Jinling, Yang Jing, Sun Xiaoming, et al. Atmospheric correction and suspended sediment concentration retrieval based on multi-spectral remote sensing images: a case study of Caofeidian offshore area[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2016, 28(3): 130-137.
- [7] 郑伟,曾志远.遥感图像大气校正方法综述[J].*遥感信息*,2004(4):66-70.
Zheng Wei, Zeng Zhiyuan. A review on methods of atmospheric correction for remote sensing images[J]. *Remote Sensing Information*, 2004(4): 66-70.
- [8] Wang Hanghang, Wang Jie, Cui Yuhuan, et al. Consistency of suspended particulate matter concentration in turbid water retrieved from sentinel-2 MSI and landsat-8 OLI sensors[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1662.
- [9] 马毅,张杰,张靖宇,等.浅海水深光学遥感研究进展[J].*海洋科学进展*,2018,36(3):331-351.
Ma Yi, Zhang Jie, Zhang Jingyu, et al. Progress in shallow water depth mapping from optical remote sensing[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(3): 331-351.
- [10] Lyzenga D R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(3): 379-383.
- [11] 杨晓彤,焦红波,李艳雯,等.两种浅海水深快速反演方法对比研究[J].*测绘科学*,2017,42(11):177-183.
Yang Xiaotong, Jiao Hongbo, Li Yanwen, et al. Comparative research of two methods for fast waterdepthretrieval for shallow water[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(11): 177-183.
- [12] 张鹰,张东,王艳姣,等.含沙水体水深遥感方法的研究[J].*海洋学报*,2008,30(1):51-58.
Zhang Ying, Zhang Dong, Wang Yanjiao, et al. Study of remote sensing-based bathymetric method in sand-containing water bodies[J]. *Haiyang Xuebao*, 2008, 30(1): 51-58.
- [13] 许海蓬,张彦彦,王磊,等.大气校正对水深遥感反演的影响分析[J].*现代测绘*,2017,40(3):1-4,9.
Xu Haipeng, Zhang Yanyan, Wang Lei, et al. Influence analysis of atmospheric correction on bathymetry remote sensing inversion[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2017, 40(3): 1-4, 9.
- [14] 张彦彦,许海蓬,吴涛,等.不同波段数目及组合对水深反演的影响[J].*江苏海洋大学学报(自然科学版)*,2020,29(2):45-49.
Zhang Yanyan, Xu Haipeng, Wu Tao, et al. The influence of different band number and combination on bathymetric inversion[J]. *Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 29(2): 45-49.
- [15] Penny P, Kathryn S, Holly B. United States Coast Pilot[M]. United States: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2014, 32: 385-386.
- [16] 田震,马毅,张靖宇,等.基于Landsat-8遥感影像和LiDAR测深数据的水深主被动遥感反演研究[J].*海洋技术学报*,2015,34(2):1-8.
Tian Zhen, Ma Yi, Zhang Jingyu, et al. Study on the bathymetry inversion by active and passive remote sensing with Landsat-8 images and LIDAR data[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(2): 1-8.
- [17] 金玉休,曹志敏,吴建政,等.辽东浅滩潮流运动特征与沉积物输运[J].*海洋地质与第四纪地质*,2015,35(6):33-40.
Jin Yuxiu, Cao Zhimin, Wu Jianzheng, et al. Tidal current movement and its bearing on sediment transportation on Liaodong shoal[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 33-40.
- [18] Vanhellemont Q, Ruddick K. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 145: 105-115.
- [19] Martins V S, Barbosa C C F, De Carvalho L A S, et al. Assessment of atmospheric correction methods for sentinel-2 MSI images applied to amazon floodplain lakes[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 322.
- [20] Shen Junjie, Jiang Jie, Du Yixi, et al. Impact of aerosol type on atmospheric correction of case II waters[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 234(1): 012019.
- [21] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [22] 丁凡.太湖OLI影像大气校正方法对比与适用性评价[D].西安:西安科技大学,2018.
Ding Fan. Comparison and applicability assessment of atmospheric correction methods of OLI images in Taihu Lake[D]. Xi'an: Xi'an

University of Science and Technology, 2018.

- [23] Cooley T, Anderson G P, Felde G W, et al. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York: IEEE, 2002: 1414–1418.
- [24] Rothman L S, Rinsland C P, Goldman A, et al. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 edition[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1998, 60(5): 665–710.
- [25] Vanhellemont Q, Ruddick K. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 161: 89–106.
- [26] Dörnhöfer K, Göritz A, Gege P, et al. Water constituents and water depth retrieval from sentinel-2A-A first evaluation in an oligotrophic lake[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 941.
- [27] Bernstein L S, Adler-Golden S M, Sundberg R L, et al. Validation of the Quick Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery[C]//Proceedings of SPIE 5806, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI. Orlando: SPIE, 2005: 668–678.
- [28] Lyzenga D R, Malinas N R, Tanis F J. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2251–2259.

Multi-dimensional analysis of atmospheric correction models on multi-spectral water depth inversion

Zhang Huanwei¹, Ma Yi^{1,2}, Zhang Jingyu¹

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Marine Telemetry Technology Innovation Centre, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: Atmospheric correction (AC) is the basis and premise of quantitative remote sensing of water column. The effects of different AC models on water depth inversion from the four aspects of AC model, AC model parameters, water component differences, and water depth inversion band combination are discussed in this paper. The research uses 6S, FLAASH, ACOLITE and QUAC four AC models, select continental, marine and urban aerosol patterns, and the shallow waters around the northwest side of Oahu Island and Shemya Island are used as the study area of clean water, while the shallow waters around Liaodong Shoal and Penang Strait are used as the study area of turbid water. AC is performed based on Landsat-8 multispectral images, and eight wavebands are used for bathymetric remote sensing inversion. The results show that: (1) all the four AC models can weaken the atmospheric influence on the water signal to some extent; the correction results of different models are somewhat different depending on the parameter selection and the components of the water column. And the peak reflectance of the two types of water column occurs in the blue and green bands, respectively. (2) The 6S model is more robust, and the bathymetric inversion results of this model are less volatile than the rest of the models due to the changes in the components of the water column. The water depth inversion results of the two aerosol models of the FLAASH have more obvious differences in turbid water, and the difference of MRE in shallow water of Liaodong Shoal is 7.9%; the ACOLITE model is significantly influenced by the water column type and has superiority and stability for turbid water, and the MRE is 5.6% lower than that of FLAASH. (3) The accuracy of multi-band water depth inversion is generally better than that of single-band, but there is no significant correlation between the accuracy of inversion and however, there is no significant correlation between the inversion accuracy and the number of bands; the combination of bathymetric inversion bands has different sensitivity to different study areas, the inversion accuracy of the three-band model is better in clean water, and the inversion accuracy of the four-band model is optimal in turbid water, and the MRE is reduced by 5.6% compared with the three-band model.

Key words: atmospheric correction; aerosol; water components; water depth inversion; band combination; accuracy analysis