

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.03.17
引用格式: 盖颖颖,王章军,杨雷,等. 金沙滩近岸水体叶绿素 a 和悬浮物遥感反演研究[J]. 国土资源遥感,2020,32(3):129 – 135. (Gai Y Y, Wang Z J, Yang L, et al. Remote sensing retrieval of chlorophyll – a and suspended matter in coastal waters of Golden Beach[J]. Remote Sensing for Land and Resources ,2020 ,32(3):129 – 135.)

金沙滩近岸水体叶绿素 a 和悬浮物遥感反演研究

盖颖颖,王章军,杨 雷,周 燕,龚金龙
(齐鲁工业大学(山东省科学院),山东省科学院海洋仪器仪表研究所,山东省海洋监测
仪器装备技术重点实验室,国家海洋监测设备工程技术研究中心,青岛 266061)

摘要: 针对现有的水质要素反演模型应用于金沙滩近岸水体的水质要素反演精度低的问题,根据机载海洋高光谱仪光谱数据,借鉴已有黄海、东海二类水体水质要素的统计反演模式,建立了基于机载高光谱仪的金沙滩近岸水体叶绿素 a 和总悬浮物的反演模型,获得了研究区叶绿素 a 和总悬浮物浓度空间分布,并分析了机载海洋高光谱仪增益对模型反演精度的影响。模型改进后,光谱仪测量数据反演结果与水体取样实测结果的拟合决定系数和平均相对误差分别为: 叶绿素 a 0.65,4.41%,总悬浮物 0.80,3.55%。通过对高光谱仪在同一海域相近时间段,但不同增益下获得的光谱数据进行叶绿素 a 和总悬浮物的反演对比,证明增益变化后,改进模型的反演平均相对误差和均方根误差均有所增加,反演精度降低,但误差仍在可接受范围内,模型稳定性整体良好。
关键词: 机载高光谱仪; 金沙滩; 近岸水体; 叶绿素 a; 总悬浮物; 增益
中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001 – 070X(2020)03 – 0129 – 07

0 引言

叶绿素 a (chlorophyll – a, Chl – a) 和总悬浮物 (total suspended matter , TSM) 是影响海洋水色的两种重要物质,其浓度变化反映了海水水质污染状况,是海洋环境监测的重要指标^[1-2]。高光谱遥感为水质评估提供了精细的水体光谱信息,然而却产生了相当大的空间和时间变化上的不确定性^[3],即在不同的区域和不同的季节,水质要素反演模型参数不同,甚至模型结构不同。星载高光谱遥感为快速建立区域性、季节性水质要素反演模型提供了有利条件,目前应用也较为广泛,如 Purandara 等^[4]建立了印度文伯纳德湖 Landsat – TM 数据和悬浮泥沙浓度之间的关系,并与现场监测数据进行了比较; 张明慧等^[5]利用 MODIS 时间序列影像数据,对福建近岸不同时相 Chl – a 浓度进行遥感反演,并对反演结果进行了分析; 孙小涵等^[6]利用荣成湾 Chl – a 浓度实测值和 HJ – 1 数据,对 3 种适用于黄海二类水体

的 Chl – a 浓度反演算法的精度进行了验证,并分析了其浓度时空变化; Cao 等^[7]基于 HJ – 1 HSI 图像对微山湖 Chl – a, TSM 和浊度进行了研究,建立了自适应的离散二进制粒子群优化算法。
但是,在现有技术条件下,星载高光谱技术难以同时实现图像的高空间分辨率,制约了空间维度上信息的获取^[8]。机载高光谱遥感具有集高空间分辨率、高时间分辨率和图像采集灵活于一体的优势,为区域水质监测应用提供了新途径。如 Mohammad 等^[9]总结了水质监测应用中常用的机载高光谱仪,指出机载高光谱传感器在配置和测量时间方面具有高度灵活性,最适合测量小尺度研究区的水质参数; Jong 等^[3]针对 AISA 机载高光谱图像,研究了不同光学算法对反演藻蓝蛋白、Chl – a 和 TSM 浓度及其空间分布的影响; 林剑远等^[10]利用 AISA 机载高光谱图像和实测数据,建立了城市河网水质参数反演模型。
唐军武等^[11]基于 Tassan 模式^[12]提出了针对黄海、东海二类水体的水质要素反演模型 (NSOAS 模

收稿日期: 2019 – 08 – 23; 修订日期: 2019 – 12 – 24
基金项目: 国家重点研发计划项目“极区大气钠荧光多普勒激光雷达探测系统研发”(编号: 2016YFC1400301)、海洋公益性行业科研专项项目“海洋高光谱仪和机载激光测量系统产品化关键技术研究及应用示范”(编号: 201505031)、国家重点研发计划项目“面向气候变化的极区大气与空间环境业务化监测与研究”(编号: 2018YFC1407300)、国家自然科学基金项目“GFRP 层板缺陷线性调频红外热波成像检测概率和特征图像融合算法研究”(编号: 61701287)和山东省重点研发计划项目“基于无人机的微型大气溶胶垂直廓线探测仪关键技术研究”(编号: 2019GGX104004)共同资助。
第一作者: 盖颖颖(1987 –), 女, 硕士, 工程师, 主要从事遥感图像处理 and 计算机视觉研究。Email: gygyy1234@163.com。
通信作者: 王章军(1982 –), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大气、海洋遥感探测技术研究。Email: zhangjun.wang@ hotmail.com。

型),主要依据水质要素的光谱特征,由海面实测光谱统计分析而来。但是本文研究区金沙滩近岸水深较浅,虽紧邻沙滩但水质清澈,在一定程度上,光谱仪接收到的水体光谱特征受海底底质影响较大,与深海二类水体光谱特征有所不同,NSOAS 模型直接应用于金沙滩近岸水体精度较低。本文在此基础上,根据金沙滩近岸水质情况,对模型进行了变形和改进,提高了模型拟合精度,并对由高光谱仪增益改变造成的光谱曲线变化对模型精度的影响进行了评估分析。

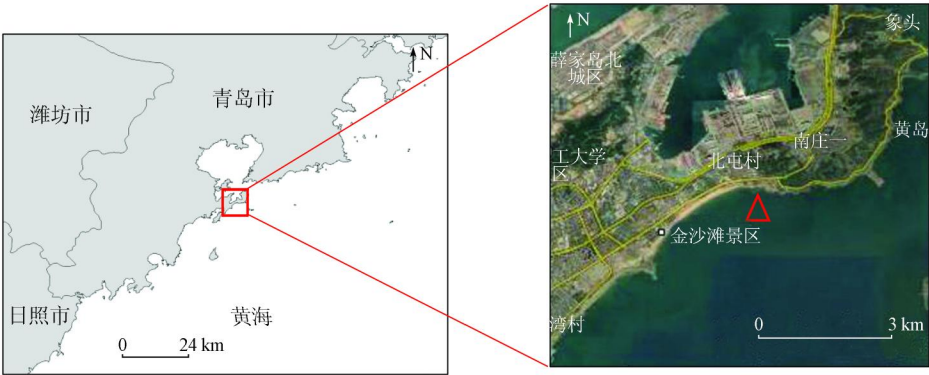


图 1 研究区位置(红色三角形处为研究区)
Fig. 1 Location of study area (red triangle represents the study area)

清澈,海水能见度较高,海洋生物繁多,常常可见到许多渔船和渔民在作业;延伸到海里的长堤便于船舶停靠,岸边有宽阔平台供搭载高光谱仪的无人机起飞和降落。

高光谱图像数据来源于山东省科学院海洋仪器仪表研究所设计研发的推扫型机载海洋高光谱成像仪 LGH1-1。仪器经过定标,满足各项指标要求。光谱范围为 400~1 000 nm,光谱分辨率为 2.1 nm,波段数为 300。光谱仪由无人机搭载,系统同时集成了惯性导航系统(inertial navigation system, INS)和全球定位系统(global positioning system, GPS),飞行过程中能够实时获取姿态和位置信息。原始影像经过辐射定标、大气校正、几何纠正、航带拼接等预处理后,得到水体遥感反射率影像。本研究使用的图像采集时间为 2018 年 12 月 17 日,当日天气状况良好,光照较为充足,岸边及海上风力均较小。无人机受电池续航因素限制,飞行时需分成 5 个航带覆盖整个研究区,研究区范围约为 850 m×230 m。由于飞行至最后一个航带时,外界光照强度变弱,因此将光谱仪增益由 0 提高至 2,故第五航带图像亮度变强(如图 2 中红色方框所示),导致图像镶嵌后整体亮度不一致。其对 Chl-a 和 TSM 反演的影响将在后文中讨论。图像获取的同时,在研究区内均匀采集海水样品 20 个,由于研究海域距离岸边较

1 研究区概况与数据源

金沙滩位于山东半岛东南部,隶属青岛市黄岛区,南濒黄海,呈月牙形向东南伸展,全长约 3 500 m,宽约 300 m。水清滩平,沙细如粉,色泽如金,属于基岩风化、改造作用形成的无障壁海岸,每天 2 次涨落潮,年平均高潮为 3.5 m,年平均低潮为 0.9 m^[13]。本文研究区位于金沙滩北岸海域(N35°58',E120°15'),如图1所示。该海域水质

近,水深较浅,船舶经过极易搅动泥沙上浮,因此到达预定采集地点后需静待几分钟后再采集。采集的海水样品在实验室内根据 GB/T 12763.6—2007 和 GB 17378.7—2007 标准采用分光光度法测量 Chl-a 浓度,采用称重法测量 TSM 浓度,用于后续建模分析。预处理后研究区遥感反射率影像真彩色合成和水样采集点位分别如图2和图3所示,其中

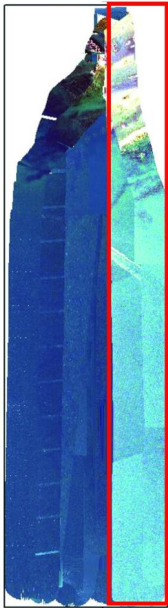


图 2 经预处理的海表高光谱真彩色合成影像
Fig. 2 Hyperspectral true color synthesis image of sea surface after preprocessed

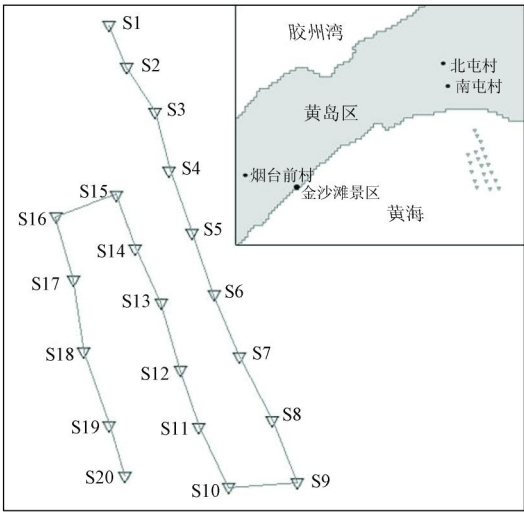


图3 海水样品采集站位图

Fig. 3 Station bitmap of seawater sample collection

S16,S17 和 S18 未能在机载高光谱仪采集区域内,其余 17 个点均匀分布于研究区内,后面将对这 17 个点的光谱数据和实测浓度进行统计分析。

2 研究方法

2.1 水体光谱特征分析

水体的光谱反射特征受到纯水、色素颗粒物、非色素颗粒物以及有色可溶性有机物的共同影响^[14]。本研究海水光谱采集于近岸冬季,金沙滩海域虽紧靠沙质海滩,但水质清澈,悬浮物浓度相对不高,且冬季藻类稀少,Chl - a 浓度也较低,另外,观测几何、光照等外界因素也会对数据采集产生一定的影响,因此该区域水体光谱特征较为复杂。根据海水样品采集点的 GPS 坐标,从预处理后影像上获得 17 个采集点的光谱曲线,经过 Savitzky - Golay 滤波平滑去除噪声后,得到水体光谱曲线如图 4 所示。

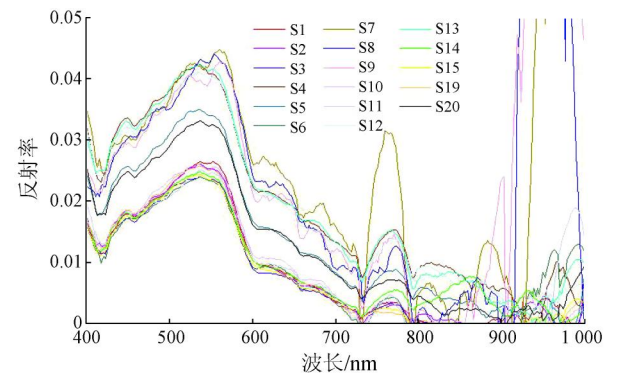


图4 海水样品采集点的水体光谱曲线

Fig. 4 Spectral curves of seawater sample collection points

从图 4 可以看出,滤波后 400 ~ 800 nm 范围内光谱曲线趋势较为一致,干扰信号去除效果较为理想。从各采样点水体光谱曲线趋势上可看出,金沙

滩海域近岸水体的光谱特征基本符合二类水体特征,但又有其独特性。400 ~ 500 nm 区间由于有色可溶性有机物和 Chl - a 的共同强吸收作用,光谱值较低,尤其 420 ~ 440 nm 之间有一个反射低谷,是由于藻类物质中的 Chl - a 吸收蓝紫光波段造成的;550 nm 附近由于悬浮颗粒物散射作用形成较大的反射峰;660 nm 附近存在一个 Chl - a 的反射率弱吸收谷;670 ~ 700 nm 范围内再次出现反射峰,该峰一般认为是 Chl - a 的荧光峰,其位置和反射率的大小随着 Chl - a 浓度的升高而向长波方向产生位移^[15];750 ~ 800 nm 范围内的反射峰是悬浮泥沙光谱反射率的又一峰值,当水中悬浮泥沙含量增大时,其反射峰也会向长波方向移动,发生红移现象。

为了减少机载采集方式下外界因素对光谱采集的影响,明确机载高光谱反演 Chl - a 和 TSM 的敏感波段,对 400 ~ 800 nm 范围内的反射率进行归一化处理,归一化光谱反射率与 Chl - a 和 TSM 浓度的相关关系如图 5 所示。

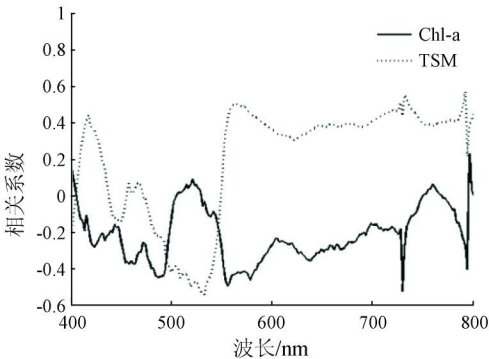


图5 归一化光谱与 Chl - a 和 TSM 相关关系

Fig. 5 Correlation between normalized spectra and chlorophyll - a or total suspended matter

由图 5 可见,归一化光谱反射率与 Chl - a 和 TSM 浓度在某些波段呈现出一定的相关性,比较明显的是在 564 nm 处,TSM 浓度与归一化光谱反射率的正相关系数约为 0.51,同时从光谱曲线上也可以看出,564 nm 处也是悬浮颗粒物的一个反射峰。Chl - a 浓度与归一化光谱反射率的相关性不如悬浮物明显,在 423 nm 处呈现负相关极大值,是由于 Chl - a 对蓝紫光波段的强吸收作用引起的;在 520 nm 处呈正相关极大值,是由于 Chl - a 对绿光的强反射作用引起的。

2.2 反演模型构建

2.2.1 Chl - a 反演

针对 Chl - a 反演,唐军武等在 Tassan 模型基础上提出了 NSOAS 模型^[11],即

$$\lg C = c_0 + c_1 \lg x + c_2 \lg^2 x \quad (1)$$

式中: C 为 Chl - a 反演浓度; c₀ , c₁ , c₂ 为拟合系

数; $x = (R_{rs(443)} / R_{rs(555)}) (R_{rs(412)} / R_{rs(510)})^a$, a 为区域常数; $R_{rs(i)}$ 为波段 i 的遥感反射率。

虽然金沙滩近岸水体水质清澈,实测 TSM 含量约在 8 ~ 12 mg/L,但冬季 Chl - a 含量较低,相对来说,悬浮泥沙对光谱曲线的影响更大。为了进一步减少悬浮泥沙对 Chl - a 反演的影响,需对 NSOAS

$$\lg C = c_0 + c_1 \lg x_1 + c_2 \lg x_2 + c_3 \lg^2 x_1 + c_4 \lg^2 x_2 + c_5 \lg x_1 \lg x_2 + c_6 \lg^3 x_2 + c_7 \lg^4 x_2 \quad , \quad (2)$$

式中: $c_0, c_1, \dots, c_7$ 为拟合系数; $x_1 = R_{rs(443)} / R_{rs(555)}$, $x_2 = R_{rs(412)} / R_{rs(510)}$ 。

以 R^2 和 APD 分别表示水质要素反演估测值与实测值之间的线性拟合决定系数和平均相对误差。

模型进行改进: x 中第 1 个比值利用 Chl - a 的吸收和反射峰来表达浓度,第 2 个比值主要用来消除水体中悬浮泥沙和黄色物质的影响,因此考虑在式(1)等式右边增加第 2 个比值的对数多次幂,同时对式(1)等式右边 $\lg^2 x$ 进行分解,使其更好地反映 Chl - a 浓度大小。经验证得到反演公式,即

通过对 17 个海水样品采集点的 Chl - a 反演估测值与实测值比较可知,NSOAS 模型 R^2 为 0.11, APD 为 8.07%,而改进模型 R^2 可达 0.65, APD 为 4.41%,改进模型的拟合精度有较大提高,如图 6 和表 1 所示。

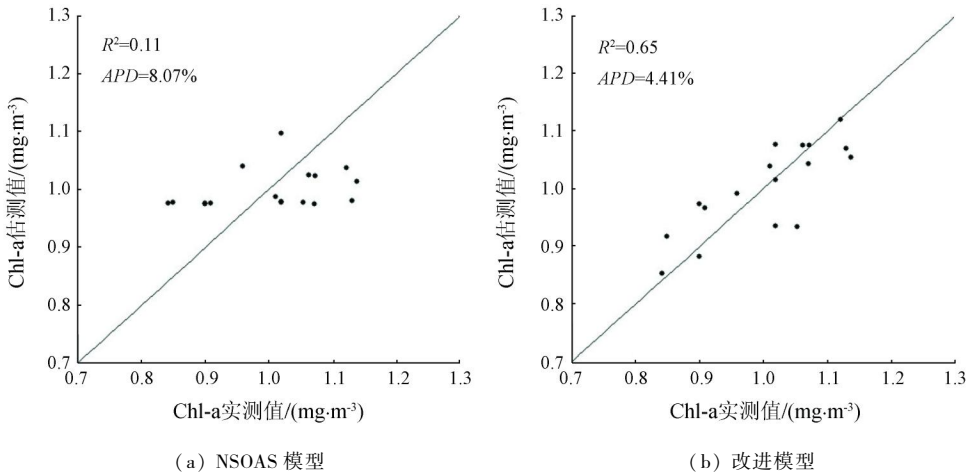


图 6 Chl - a 模型估测值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of estimated results and measured results for Chl - a models

表 1 Chl - a 反演模型改进前后精度对比

Tab.1 Accuracy comparison of Chl - a models before and after improvement

模型	均方根误差/ (mg·m ⁻³)	平均相对 误差/%	决定系数
NSOAS 模型	0.09	8.07	0.11
改进模型	0.06	4.41	0.65

2.2.2 TSM 反演

对于 TSM 反演,Tassan 根据各水体组分的不同反射特征,建立了反演公式,即

$$\lg S = s_0 + s_1 \lg x \quad , \quad (3)$$

式中: S 为 TSM 反演浓度; s_0 和 s_1 为拟合系数; $x = (R_{rs(555)} + R_{rs(670)}) (R_{rs(490)} / R_{rs(555)})^b$, b 为区域常数。唐军武等^[11] 在 Tassan 模式基础上提出了 NSOAS 线性模型,即

$$\lg S = s_0 + s_1 x_1 + s_2 x_2 \quad , \quad (4)$$

式中: s_0, s_1, s_2 为拟合系数; $x_1 = R_{rs(555)} + R_{rs(670)}$; $x_2 = R_{rs(490)} / R_{rs(555)}$ 。

结合 Tassan 模型对悬浮泥沙反射特征和消除

Chl - a 与黄色物质影响的分析,以及 NSOAS 线性模型更适用于黄海、东海二类水体的双重考虑,本文选择将两种模型组合形成新的模型,即

$$\lg S = s_0 + s_1 \lg x_1 + s_2 \lg x_2 + s_3 x_1 + s_4 x_2 \quad , \quad (5)$$

式中: $s_0, s_1, \dots, s_4$ 为拟合系数; $x_1 = R_{rs(555)} + R_{rs(670)}$; $x_2 = R_{rs(490)} / R_{rs(555)}$ 。

通过对 17 个海水样品采集点的 TSM 反演估测值与实测值比较可以看出,Tassan 模型和 NSOAS 模型应用于金沙滩近岸水体 TSM 反演,其线性拟合决定系数大致相同,均不到 0.5,平均相对误差约为 5.8%;而改进后的模型线性拟合决定系数可达 0.74,平均相对误差下降为 4.41%,证明模型改进后该区域水体 TSM 反演精度有较大提高,如图 7 (a) — (c) 所示。根据金沙滩近岸水体归一化光谱反射率与 TSM 浓度的相关性分析,TSM 浓度与光谱反射率在 564 nm 和 886 nm 处具有较高相关性,因此考虑用 564 nm 处反射率代替改进模型中 555 nm 处反射率,其拟合精度又有一定提高,如图 7 (d) 所示。模型改进前后精度对比如表 2 所示。

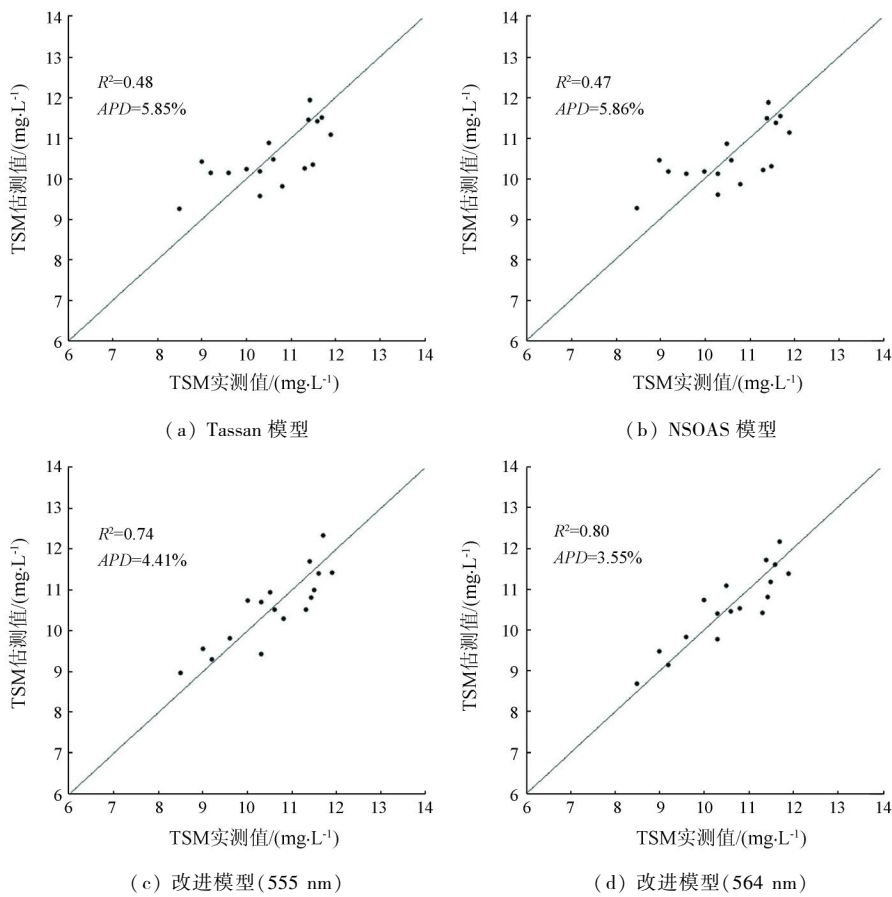


图 7 TSM 模型估测值与实测值对比

Fig. 7 Comparison of estimated results and measured results for TSM models

表 2 TSM 反演模型改进前后精度对比			
Tab. 2 Accuracy comparison of TSM models before and after improvement			
模型	均方根误差/ (mg·L ⁻¹)	平均相对 误差/%	决定系数
Tassan 模型	0.73	5.85	0.48
NSOAS 模型	0.73	5.86	0.47
改进模型(555 nm)	0.52	4.41	0.74
改进模型(564 nm)	0.45	3.55	0.80

2.3 水色浓度空间分布

将所建立的 Chl - a 和 TSM 浓度模型应用于机载高光谱仪获取的高光谱数据上,计算得到该研究区水体 Chl - a 和 TSM 浓度空间分布,如图 8 所示。由图可见,Chl - a 浓度约在 0.9 ~ 1.2 mg/m³ 之间,由于研究区范围较小,Chl - a 整体变化趋势不明显,岸边 Chl - a 浓度略高于远海; TSM 浓度约在 8 ~ 12 mg/L 之间,岸边 TSM 浓度高于远海,表现出比较明显的变化趋势。获取第五航带图像时,虽提高增益,但第五航带反演结果依然噪声较多,误差较大,特别对于 TSM,高光谱仪成像每推扫 5 000 行保存为一个文件,第五航带中只包含海面的图像受光照影响尤其大,光谱信息几乎被噪声覆盖,因此与其他航带相比,第五航带的反演结果具有较大差异。

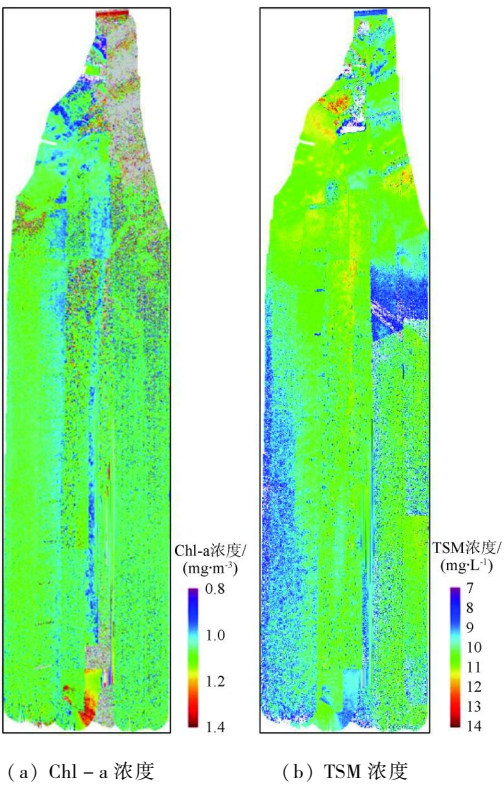


图 8 研究区 Chl - a 和 TSM 浓度空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of Chl - a and TSM concentration in the study area

2.4 模型敏感性分析

机载海洋高光谱仪获取海面高光谱图像时,若光照条件不佳,需增大高光谱仪增益,提高图像亮度,但是同时也会放大噪声。在曝光时间不变的前提下,增大增益对图像信噪比的影响并不大。随机选择若干第五航带和其他航带重叠区域的位置点,得到其在两个增益条件下获得的光谱曲线对比如图 9 所示。可见,相同位置海面水体的光谱反射率随着增益增加出现较小程度的增大,但是光谱曲线趋势几乎不变,故与水质要素反演相关的敏感波段位置没有太大变化。

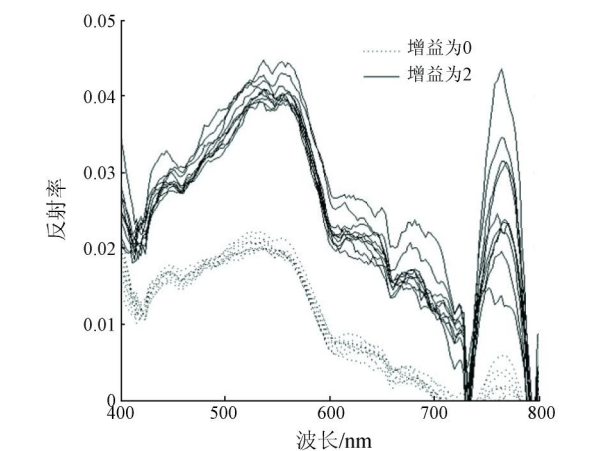


图 9 不同增益下海水光谱曲线对比
Fig. 9 Comparison of seawater spectral curves under different gains

为了研究不同增益对 Chl - a 和 TSM 反演模型的敏感性,从增益为 0 的采样点中随机选择 11 个用于拟合反演模型,对其他增益为 0 和增益为 2 的采样点分别进行验证,计算其平均相对误差和均方根误差如表 3 所示。

表 3 不同增益下模型估算误差表 Tab. 3 Model estimation errors under different gains				
水质要素	拟合点增益	验证点增益	平均相对误差/%	均方根误差
Chl - a	0	0	8.99	0.09 mg/m ³
	0	2	15.90	0.20 mg/m ³
TSM	0	0	8.02	0.86 mg/L
	0	2	9.41	1.25 mg/L

由上表可知,针对两种水质要素,以增益为 0 部分采样点拟合模型参数,估算增益为 2 采样点的水色浓度误差总是高于增益为 0 采样点。可见增益变化之后,模型估算的平均相对误差和均方根误差均有所增加,但误差在可以接受的范围内,总体来说模型还具有较好的稳定性。

3 结论

本文针对金沙滩近岸水体 Chl - a 和 TSM 浓度

的遥感反演,在分析机载高光谱仪获取的水体光谱反射率特征基础上,对 NSOAS 二类水体水质要素反演模型进行改进,得到了适用于机载高光谱数据的 Chl - a 和 TSM 浓度反演模型,并分析了高光谱仪增益对模型敏感性的影响。

1) 利用改进后的模型,Chl - a 和 TSM 的反演值与实测值的拟合决定系数最优分别可达 0.65 和 0.80,平均相对误差分别为 4.41% 和 3.55%。

2) 通过高光谱仪增益为 0 的部分采样点拟合的模型参数,估算增益为 2 的采样点海水水色浓度,得到 Chl - a 和 TSM 反演的平均相对误差和均方根误差均高于增益为 0 的采样点,但误差在可接受范围内,模型具有较好的稳定性。

本文提出的金沙滩近岸水体 Chl - a 和 TSM 遥感反演模型建立在机载高光谱仪获取的图像数据基础上,图像的辐射定标、大气校正等预处理过程会对光谱产生巨大的影响,以船载光纤光谱仪数据为依据,讨论机载高光谱图像预处理对反演模型精度的影响将是下一步的工作。

参考文献 (References):

[1] Kim H C, Son S, Kim Y H, et al. Remote sensing and water quality indicators in the Korean west coast: Spatio-temporal structures of MODIS-derived chlorophyll - a and total suspended solids [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 121 (1 - 2): 425 - 434.

[2] 姜丽君. 基于遥感反演的近 20 a 莱州湾表层悬浮泥沙和叶绿素 a 时空变化研究 [D]. 烟台: 鲁东大学, 2018.

Jiang L J. Temporal and spatial variations of suspended sediment and chlorophyll - a in Laizhou Bay in recent 20 years based on remote sensing inversion [D]. Yantai: Ludong University, 2018.

[3] Jong C P, Mayzonee L, Yong S K, et al. High-spatial resolution monitoring of phycocyanin and chlorophyll - a Using Airborne Hyperspectral imagery [J]. Remote Sensing, 2018, 10 (8): 1 - 31.

[4] Purandara B K, Jamadar B S, Chandramohan T, et al. Water quality assessment of a lentic water body using remote sensing: A case study [C]//Singh V P. Environmental Pollution. Singapore: Springer, 2018: 371 - 380.

[5] 张明慧, 苏 华, 季博文. MODIS 时序影像的福建近岸叶绿素 a 浓度反演 [J]. 环境科学学报, 2018, 38 (12): 4831 - 4839.

Zhang M H, Su H, Ji B W. Retrieving nearshore chlorophyll - a concentration using MODIS time-series images in the Fujian Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38 (12): 4831 - 4839.

[6] 孙小涵, 胡连波, 冯永亮, 等. 基于 HJ - 1 卫星数据的荣成湾叶绿素 a 浓度时空变化特征分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2018 (5): 72 - 79.

Sun X H, Hu L B, Feng Y L, et al. Temporal and spatial analysis of chlorophyll a concentration patterns in Rongcheng Bay using HJ - 1 satellite data [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018 (5): 72 - 79.

[7] Cao Y, Ye Y T, Zhao H L, et al. Remote sensing of water quality

based on HJ-1A HSI imagery with modified discrete binary particle swarm optimization - partial least squares (MDBPSOPLS) in inland waters: A case in Weishan Lake[J]. Ecological Informatics, 2018, 44: 21-32.

[8] 潘邦龙,申慧彦,邵 慧,等. 湖泊叶绿素高光谱空谱联合遥感反演[J]. 大气与环境光学学报, 2017, 12(6): 428-434.

Pan B L, Shen H Y, Shao H, et al. Combined inversion of Hyper-spectral remote sensing of space and spectrum for lake chlorophyll [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2017, 12(6): 428-434.

[9] Mohammad H G, Assefa M M, Lakshmi R. Spaceborne and airborne sensors in water quality assessment [J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(14): 3143-3180.

[10] 林剑远, 张长兴. 航空高光谱遥感反演城市河网水质参数[J]. 遥感信息, 2019, 34(2): 23-29.

Lin J Y, Zhang C X. Inversion of water quality parameters of urban river network using airborne hyperspectral remote sensing[J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(2): 23-29.

[11] 唐军武, 王晓梅, 宋庆君, 等. 黄、东海二类水体水色要素的统计反演模式[J]. 海洋科学进展, 2004, 22: 1-7.

Tang J W, Wang X M, Song Q J, et al. Statistical inversion models for case II water color elements in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22: 1-7.

[12] Tassan S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. Applied Optics, 1994, 33(12): 2369-2378.

[13] 杨俊生, 葛毓柱, 吴 琼, 等. 黄岛金沙滩现代波痕沉积特征与水动力关系[J]. 科技导报, 2014, 32(1): 22-29.

Yang J S, Ge Y Z, Wu Q, et al. Characteristics of ripples both in morphology and sediments in Golden Beach Coastal Zone, Huangdao and the relationship with hydrodynamics[J]. Science and Technology Review, 2014, 32(1): 22-29.

[14] 毕 顺, 李云梅, 吕 恒, 等. 基于 OLCI 数据的洱海叶绿素 a 浓度估算[J]. 湖泊科学, 2018, 30(3): 701-712.

Bi S, Li Y M, Lyu H, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Erhai based on OLCI data[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(3): 701-712.

[15] 黄启会, 贺中华, 梁 虹, 等. 基于高光谱数据的百花湖叶绿素 a 浓度估算[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(1): 134-141.

Huang Q H, He Z H, Liang H, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in Baihua Lake water based on hyperspectral data[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 42(1): 134-141.

Remote sensing retrieval of chlorophyll - a and suspended matter in coastal waters of Golden Beach

GAI Yingying, WANG Zhanjun, YANG Lei, ZHOU Yan, GONG Jinlong

(Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Monitoring Instrument Equipment Technology, National Engineering and Technological Research Center of Marine Monitoring Equipment, Qingdao 266061, China)

Abstract: In view of the low precision of existing water quality element retrieval models applied to the coastal waters of Golden Beach, the authors, based on the statistical retrieval models of water color for case II water body in Yellow Sea and East China Sea by Tang Junwu, established the retrieval models of chlorophyll - a and total suspended matter concentration for coastal waters of Golden Beach by using the spectral data obtained from airborne marine hyper-spectrometer. The spatial distribution of chlorophyll - a and total suspended matter concentration in the study area was obtained and the influence of hyper-spectrometer gain on model retrieval accuracy was analyzed. After the models were improved, the determination coefficients and average relative errors between the retrieval results from spectrometer measurements and the sampling measurements were respectively chlorophyll - a 0.65, 4.41%, and total suspended matter 0.80, 3.55%. Retrieval results from the same spectrometer at the same coordinates and approximate time but under different gains were compared. It is proved that retrieval average relative errors and root mean square errors of improved models are all increased and the retrieval accuracy is reduced if gain changes. However, the error is in the allowable range and the model stability is good overall.

Keywords: airborne hyper-spectrometer; Golden Beach; coastal water; chlorophyll - a; total suspended matter; gain

(责任编辑: 李 瑜)