

北方半干旱区典型湖泊——岱海透明度遥感反演(2013—2020年)*

刁瑞翔¹, 青松^{1**}, 越亚嫫¹, 郝艳玲², 包玉海¹

(1: 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022)

(2: 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 水体的透明度是评价水质的重要指标, 在水生态系统中起着重要的作用. 借助遥感技术可以获得大范围、实时数据, 并且有节省人力物力的优点. 本文利用岱海的野外实测透明度数据和光谱数据, 针对 Sentinel-2 MSI 和 Landsat-8 OLI 卫星数据波段设置, 建立了岱海水体透明度反演模型. 结果表明: 1) 本文建立的透明度反演模型中, 蓝红波段比二次模型反演精度最好, 决定系数 $R^2 = 0.66$, 均方根误差 ($RMSE$) 为 24.02 cm, 平均绝对百分比误差 ($MAPE$) 为 21.24%. 2) 将蓝红波段比二次模型应用于 Landsat-8 OLI 和 Sentinel-2 MSI 卫星数据, 透明度反演精度较好, $MAPE < 28.82\%$, $RMSE < 23.26$ cm, $R^2 > 0.60$. 3) 此算法应用于时间序列 MSI 和 OLI 影像, 得到了岱海水体透明度时空分布特征. 结果表明, 岱海水体透明度年平均变化范围在 90.71~120.77 cm, 2015 年的平均透明度最高, 2013 年的平均透明度最低; 月平均变化范围在 90.68~122.53 cm, 7 月的平均透明度最高, 5 月的平均透明度最低. 岱海透明度在空间上的分布趋势大致表现为西北高, 东南低, 中部高, 四周低. 4) 影响岱海水体透明度变化的主要因素为风速和降水, 透明度与风速和降水分别具有显著的负相关和正相关关系.

关键词: 水体透明度; Sentinel-2 MSI; Landsat-8 OLI; 相关分析; 遥感反演; 岱海

A typical lake in the semi-arid area of northern China—The remote sensing retrieved of the transparency of the Lake Daihai (2013–2020) *

Diao Ruixiang¹, Qing Song^{1**}, Yue Yalei¹, Hao Yanling² & Bao Yuhai¹

(1: College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, P.R.China)

(2: School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, P.R.China)

Abstract: The transparency of water bodies is an important indicator for evaluating water quality and plays an important role in the water ecosystem. With the help of remote sensing technology, large-scale, real-time data can be obtained, and it has the advantage of saving manpower and material resources. According to the Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI satellite data band settings, the Lake Daihai water body transparency retrieved model is established based on the measured transparency data and spectral data of Lake Daihai in this study. The results show that: 1) Among the transparency retrieved model established in this study, the blue-red band ratio quadratic model has the best retrieved accuracy than the quadratic model ($R^2 = 0.66$, $RMSE = 24.02$, $MAPE = 21.24\%$). 2) Applying the blue-red band ratio quadratic model to Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI satellite data, the transparency retrieved accuracy is better ($MAPE < 28.82\%$, $RMSE < 23.26$ cm, $R^2 > 0.60$). 3) This algorithm is applied to MSI and OLI images, and the temporal and spatial distribution characteristics of the transparency of the Lake Daihai water body are obtained. The results showed that the average annual change range was 90.71–120.77 cm, the average transparency in 2015 was the highest, and the average transparency in 2013 was the lowest. The monthly range changed from 90.68 to 122.53 cm, the average transparency in July was the highest, and the average transparency in May was the lowest. The spatial distribution trend of Lake Daihai's water transparency is roughly high in the northwest, low in the southeast, high in the middle, and low in the central. 4) The main factors affecting the transparency of the Lake Daihai water body are wind speed and precipitation. The transparency and wind speed, pre-

* 2020-11-22 收稿; 2020-12-14 收修稿稿.

国家自然科学基金项目(41961057)、内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT-17-B04)和内蒙古自然科学基金项目(2019MS04013)联合资助.

** 通信作者; E-mail: qingsong@imnu.edu.cn.

precipitation have a significant negative correlation and positive correlation, respectively.

Keywords: Water transparency; Sentinel-2 MSI; Landsat-8 OLI; correlation analysis; remote sensing retrieved; Lake Daihai

湖泊是地球生态系统重要组成部分,具有调节区域生态环境、储存水量、保护生物多样性和维持生态系统平衡等功能,然而,由于气候变化和人类活动,湖泊日益富营养化,其水质不断恶化.透明度是直接记录水体光学特征和水质清澈度评估的一个重要指标,因此透明度的遥感反演研究对水环境变化、水生态系统以及初级生产力具有重要意义^[1-3].

塞氏盘可以准确测量水体的透明度,船舶走航测量方法速度慢,周期长,费用高等局限性.遥感技术具有重访周期短、大面积同步和低成本等优点,弥补了传统观测的不足,近年来被许多国内外学者广泛应用于水体透明度反演研究^[4-6].透明度遥感反演方法可分为半分析模型和经验模型,半分析模型物理基础较好,往往不需要现场数据重新校准^[7].Doron等^[8]提出了经典的透明度遥感估算半分析模型,在此基础上, Lee等^[9]建立了一种新的半分析模型,并应用于 Landsat-8 OLI 卫星遥感数据;Jiang等^[10]改进了 Lee 模型,并将算法应用于 MERIS 数据,评估了日本霞浦湖区域的透明度变化特征.然而,半分析模型的部分参数获取困难且模型形式复杂,因此在光学复杂水体中透明度的反演存在不确定性.经验方法通常利用单波段、波段比或波段组合与透明度之间的回归关系来估算水体的透明度,具有波段选择灵活、计算过程简便、精度高等优点^[11],已广泛应用到多种卫星遥感数据.基于 MODIS、SeaWiFS、MERIS 等数据,He等^[12]利用 SeaWiFS 卫星观测全球海洋透明度的变化;Wu等^[13]基于 MODIS 数据对鄱阳湖的透明度进行了监测;Fabricius等^[14]利用 2002—2013 年的 MODIS 影像数据,对澳大利亚东北沿岸的大堡礁大陆架上的河流排放对水体透明度的影响进行长时间的监测;Doron等^[8]使用 MERIS、MODIS 和 SeaWiFS 数据估计塞氏盘深度的算法的验证;Shen等^[15]基于实测数据和哨兵-3 海陆色度仪(OLCI)图像,建立了随机森林回归的透明度模型.然而,这些卫星数据的空间分辨率低,不适合河口海岸、内陆湖泊等小区域水体的监测.相比而言,Landsat 系列卫星 Thematic Mapper(TM)、Enhanced Thematic Mapper(ETM+)、Operational Land Imager(OLI)和 Sentinel-2 卫星 MultiSpectral Instrument(MSI)等传感器具有高空间和光谱分辨率的优点,已广泛应用于水域遥感监测. Luis等^[16]利用 Landsat-8 卫星数据估算了美国东北部沿海地区的水体透明度;Setiawan等^[17]基于 TM 和 ETM+ 卫星影像在印度尼西亚的马宁焦湖的水体透明度进行长期监测. Bonansea等^[18]基于 Sentinel-2 MSI 影像,利用近红波段和绿波段的比值反演了阿根廷里奥特尔塞罗水库的透明度.然而,这两种数据的结合应用鲜有文献报道.

内陆湖泊和河口海岸水域,水体生物光学性质复杂、变化速率快、区域小,需要高空间和时间分辨率的遥感数据. Sentinel-2 MSI 和 Landsat-8 OLI 的结合,能够实现这些区域水体的高频(重访周期优于 5 d)、精细调查(空间分辨率能达到 20~30 m).另一方面,中国南方和北方湖泊的生物光学特征差异明显,如华东地区太湖(蓝藻主导)和内蒙古自治区岱海(有色溶解物主导).从某种程度上说,透明度作为最基本的水质参数,对北方湖泊来讲是最重要的表征指标.

因此,本文的目的是以内蒙古岱海为研究区,开展如下研究:(1)基于实测数据建立岱海水体透明度经验模型;(2)将建立的透明度经验算法应用于 Sentinel-2 MSI 和 Landsat-8 OLI 遥感数据;(3)对比本文建立的透明度算法与其他算法的反演结果;(4)分析岱海水体透明度的时空分布特征及影响因素.

1 研究区和数据

1.1 研究区概况

岱海(40°29′07″~40°37′06″N, 112°33′31″~113°46′40″E)位于内蒙古自治区乌兰察布市凉城县境内,处于一个狭长的陷落盆地之中,南有马头山,北有蛮汉山拱卫(图 1).岱海流域是我国“两屏三带”生态安全战略格局中北方防沙带的重要一环,也是京津冀地区生态屏障

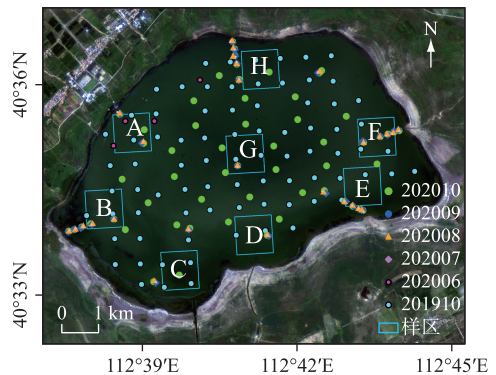


图 1 岱海及实测站位

Fig.1 Lake Daihai and *in situ* measured sites

的重要组成部分,地处南亚至西伯利亚生态走廊的重要结点^[19]. 1960s 初,岱海湖面积达 182.46 km². 近年来,由于降水减少、水资源过度开发等原因,岱海急剧萎缩,水位骤降,水质变劣,截至 2020 年 10 月,湖泊面积为 49 km²左右,并仍呈缩减态势发展^[20]. 所在地区属于中温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 2~5℃,无霜期平均 120 d 左右,降水主要集中在 6—9 月. 岱海表层多年平均水温为 8~9℃,每年 11 月份开始结冰,翌年的 4 月份解冻,一年中有 5 个月为结冰期. 岱海属于典型的内陆咸水湖泊,系全区闻名的四大水产基地之一,其水源由周围 20 多条河流和深层地下水汇聚而成,湖中生物由浮游生物、底栖生物、水生维管束植物及鱼、蟹、虾等组成,对调节气候、涵养水源、维持生态等方面有重要意义^[21-23]. 然而岱海长期在自然和人为因素的驱动下,水质有所降低,因此,保护岱海刻不容缓^[24].

1.2 实测数据

1.2.1 光谱数据 2019 年 10 月 9 日和 10 日、2020 年 6 月 14 日、7 月 21 日、8 月 24 日、9 月 17 日、10 月 11 日和 12 日在岱海水域开展了 8 次的野外调查,共获取了 220 组(图 1)遥感反射率光谱(R_{rs})数据. 采用美国 ASD 公司生产的 ASD Field Spec 4 地物光谱仪测量遥感反射率,测量时应避免船舶阴影和太阳直射反射,具体测量步骤参考了唐军武等的方法^[25],测量的波段范围为 350~2500 nm,在透明度反演中应用的波段范围是 400~900 nm,每个站点测量了标准灰板、水体和天空的辐射亮度,并利用如下公式(1)计算 R_{rs} (图 2a).

$$R_{rs} = (L_w - r \cdot L_{sky}) / (\pi L_p / \rho_p) \quad (1)$$

式中, L_w 、 L_{sky} 、 L_p 分别为测量的水体、天空和标准灰板的辐射亮度; ρ_p 为标准灰板的反射率; r 为无量纲气-水界面的反射率,对于平静水面取值 0.022^[26].

本文的目的是利用 Sentinel-2 MSI 和 Landsat-8 OLI 遥感数据进行水体透明度的反演,针对上述两个传感器的波段设置,进行了岱海实测遥感反射率的波段积分运算,具体见公式(2),波段积分结果如图 2b 和图 2c 所示,光谱响应函数如图 3a 和图 3b 所示.

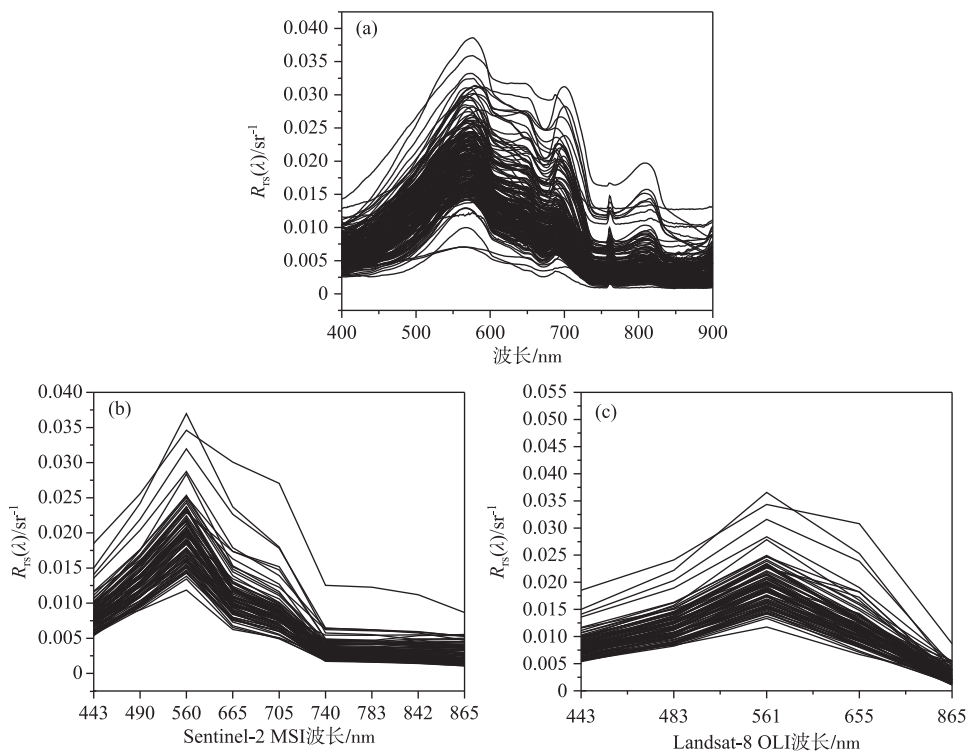


图2 岱海水体实测遥感反射率光谱(a)、MSI波段积分(b)和OLI波段积分(c)

Fig.2 *In situ* remote sensing reflectance spectra(a), MSI band integration(b) and OLI band integration(c) in Lake Daihai

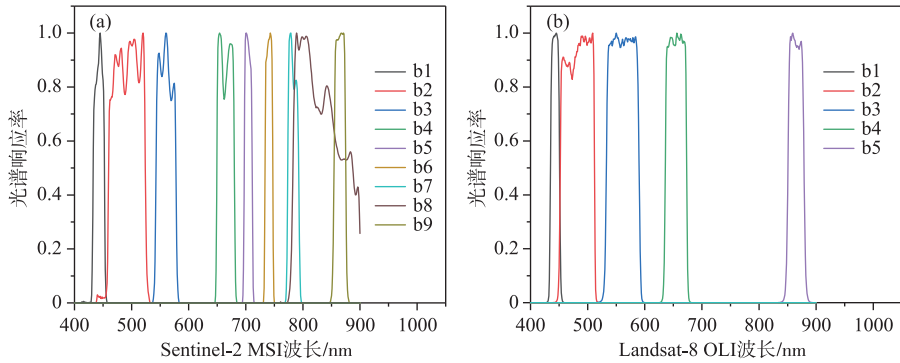


图3 光谱响应函数: Sentinel-2 MSI(a); Landsat-8 OLI(b)

Fig.3 Spectral response function: Sentinel-2 MSI(a); Landsat-8 OLI(b)

$$R_{rs}(\lambda_i) = \frac{\sum_{j=1}^n F_i(\lambda_j) R_{rs}(\lambda_j)}{\sum_{j=1}^n F_i(\lambda_j)} \quad (2)$$

式中, $R_{rs}(\lambda)$ 表示实测遥感反射率(sr^{-1}), F_i 表示数据的第 i 波段的光谱响应函数(图3), λ_j 表示实测光谱数据的第 j 个波段, λ_i 表示影像光谱数据的第 i 个波段。

1.2.2 透明度数据 在野外调查中,与遥感反射率同步采集了220组透明度数据。每个站点,利用黑白相间的塞氏圆盘^[27]测量透明度。测量时将塞氏盘平稳地放入水中,直到看不见塞氏盘时,记录下沉深度作为观测站点的透明度值。

1.3 气象数据

本文用到的气象数据是从中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)下载的2013—2020年岱海(凉城气象站)风速和降水数据,用于分析这两个参数对透明度的影响。

1.4 遥感数据及预处理

本文选用了 Sentinel-2A MSI 和 Landsat-8 OLI 数据,反演岱海水体的透明度。Sentinel-2 卫星搭载多光谱成像仪 MSI,共有13个波段,从可见光、近红外到短波红外,空间分辨率各不相同,分别为10、20和60 m, Sentinel-2 A 和 B 两颗卫星在过境时间上互补,重访周期为5 d^[28-30]。Landsat-8 于2013年2月11日发射,是美国陆地卫星计划的第8颗卫星,该数据重访周期为16 d,携带陆地成像仪 OLI,OLI 包括9个波段^[31-32]。Sentinel-2 MSI 数据可从欧空局官网(<https://scihub.copernicus.eu/>)免费下载得到, Landsat-8 OLI 影像从美国地质调查局官网(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)免费下载得到。

选用了 MSI Level-2A 级地表反射率产品(MSI-2A)和 Landsat-8 OLI 地表反射率产品(OLI-SR)。MSI-2A 是欧空局提供的 Sen2cor 对 Sentinel-2 卫星影像进行大气校正^[33]。该算法的核心是大气辐射传输模型 libRadtran^[34]。libRadtran 是用于计算大气辐射传输的软件包,该算法用离散纵坐标法计算地球大气、太阳以及热辐射传输,包含平面、二流、多流、伪球面和球面等不同计算模块^[35],适用于各种大气条件,包括太阳和部分地球光谱的辐射、辐照度和光化通量^[36]。Sen2cor 基于 libRadtran 代码生成的查找表进行大气校正,并且利用 Python 编译的可移植代码,提供用户命令和集成软件^[37]。OLI-SR 数据是基于 6S 大气辐射模拟模型的基础上,参照 LaSRC(Landsat Surface Reflectance Code)大气校正流程^[38],在 RSD(Remote Sensing Desktop)平台处理而成的。

将 MSI-2A 和 OLI-SR 数据的各个波段灰度值乘以0.0001,得到地表反射率,并通过如下公式(3)转化为遥感反射率。影像进行陆地掩膜,裁剪,并重采样 MSI-2A 产品,得到与 OLI-SR 数据统一的空间分辨率。

$$R_{rs} = \rho_w / \pi \quad (3)$$

式中, ρ_w 是地表反射率, R_{rs} 为遥感反射率。

共下载了 47 景清晰无云的影像,其中 OLI 影像有 27 景,MSI 影像有 20 景,收集影像数据时,排除每年 11 月初到翌年 3 月底(岱海为结冰期)的影像和有云的影像.

为了能够准确地得到水色信息,应将大气的影响从接收到的辐射信号中剔除. 利用时空匹配的实测遥感反射率数据,验证了 MSI 和 OLI 数据的大气校正结果,见图 4.

从图 4a 中可以看到 2020 年 8 月 24 日,实测与同一天 Landsat-8 OLI 的光谱反射率具有较好的一致性, $R^2=0.79$, $RMSE=0.01\text{ sr}^{-1}$, $MAPE=36.70\%$. 图 4b 中,2020 年 10 月 12 日实测与 Sentinel-2 MSI 的光谱反射率之间的 $R^2=0.87$, $RMSE=0.01\text{ sr}^{-1}$, $MAPE=21.97\%$. 这些结果表明了 MSI 和 OLI 数据大气校正结果的可靠性.

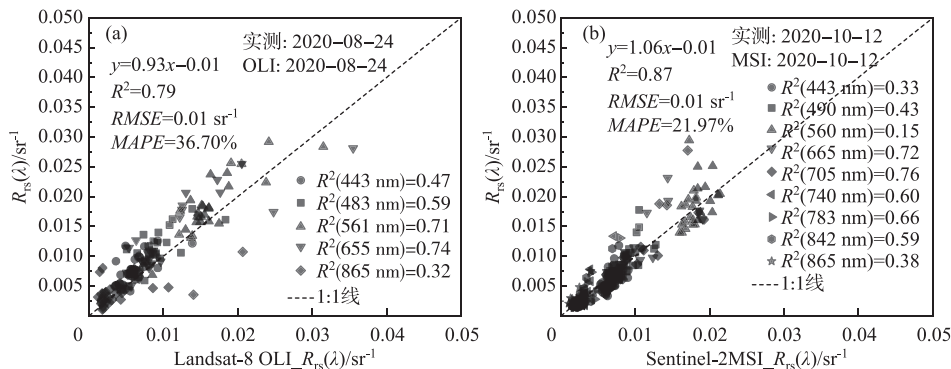


图 4 实测遥感反射率分别与 Landsat-8 OLI(a) 和 Sentinel-2 MSI(b) 遥感反射率的对比

Fig.4 Comparison of measured remote sensing reflectance with Landsat-8 OLI remote sensing reflectance(a) and Sentinel-2 MSI remote sensing reflectance(b)

2 方法

2.1 相关性分析

为了确定水体透明度的敏感波段,进行了透明度与遥感反射率之间的相关分析,找出相关性最高的单波段和波段比. 相关性分析采用了皮尔逊相关系数(Pearson),公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

表 1 本文建立的经验算法表达式*

Tab.1 Empirical algorithm expression established in this study

模型	表达式
波段比二次	$\ln SD = a_1 \cdot x_1^2 + a_2 \cdot x_1 + b$
波段比一次	$\ln SD = a_1 \cdot x_1 + b$
单波段二次	$\ln SD = a_1 \cdot x_2^2 + a_2 \cdot x_2 + b$
单波段一次	$\ln SD = a_1 \cdot x_2 + b$
波段组合模型	$\ln SD = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + b$

* a_1 、 a_2 、 b 均为模型参数, x_1 、 x_2 分别代表波段比 $R_{rs}(\lambda_i)/R_{rs}(\lambda_j)$ 和单波段 $R_{rs}(\lambda_i)$. 本文一共有 220 组数据,其中 165 组数据用于建模,剩余的 55 组数据用于模型精度验证.

式中, n 是样本数量, x_i 、 y_i 分别是实测透明度和实测遥感反射率对应的 i 点观测值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别是实测透明度和实测遥感反射率的样本平均数.

2.2 经验算法建立

基于相关分析的结果,利用回归分析方法,建立透明度反演经验模型,包括波段比模型、单波段模型和波段组合模型. 为了消除异方差,使数据更加平稳,建模时将原始透明度数据取自然对数,模型的通用表达式见表 1.

2.3 精度检验

本文使用均方根误差 (root mean square error, $RMSE$)、平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, $MAPE$) 以及决定系数 R^2 来评估本文模型的反演

精度,公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{estimated,i} - X_{measured,i})^2}{N}} \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{measured} - X_{estimated}|}{X_{measured}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, $X_{estimated}$ 代表估算透明度, $X_{measured}$ 代表实测透明度, N 代表数据的数量.

2.4 区域划分

岱海区域的地势为四周高,中间低,周边的河流都汇入岱海,整个水系为向心状^[39]. 因此,为了更好地刻画岱海水体时空分布特征,本文根据周边的河流和典型区域选取 A~H 8 个区域(每个区域大小为 1000 m×1000 m,图 1). 其中,A 区为岱海旅游景点入口;B 区为弓坝河,此河是岱海应急补水工程的管线汇入口;C 区是五号河入口;D 区是步量河入口;E 区是天成河入口,并且距离岱海约 2 km 处的成天河上修建了水库,名字为石门水库;F 区是目花河入口;G 区是岱海湖中心;H 区是索代沟河入口.

3 结果与讨论

3.1 透明度敏感波段选取

水体遥感反射率光谱曲线的趋势为:遥感反射率在 400~560 nm 波段附近持续上升,在 560~580 nm 波段范围内形成了峰值,随后遥感反射率急剧下降到 600 nm 处;从 600~650 nm 附近开始缓慢下降,大约在 670 nm 处出现小的波谷;约在 690 nm 波段处出现第二个小峰值;从 690 nm 波段接着下降到 750 nm 波段处,接着上升,并在 760 nm 附近并出现明显的小峰值,在 770 nm 处缓慢上升,在 810 nm 附近又出现峰值,然后呈下降趋势,到 900 nm 处又有上升的趋势.

使用 MATLAB 软件计算了透明度和遥感反射率光谱之间的皮尔逊相关系数,结果见图 5 和图 6. 图 5a 是 Sentinel-2 MSI 单波段光谱反射率与实测透明度的相关性分析,皮尔逊系数总体范围在 -0.71~-0.26 之间,其中,波段 705 nm 处的皮尔逊系数为 -0.71,与实测透明度的相关性最高. 图 5b 是 Landsat-8 OLI 的单波段光谱反射率与实测透明度的相关性分析,其相关性最高的波段在 655 nm 的红波段处,皮尔逊系数为 -0.62,说明在 OLI 波段中,红波的相关性最好.

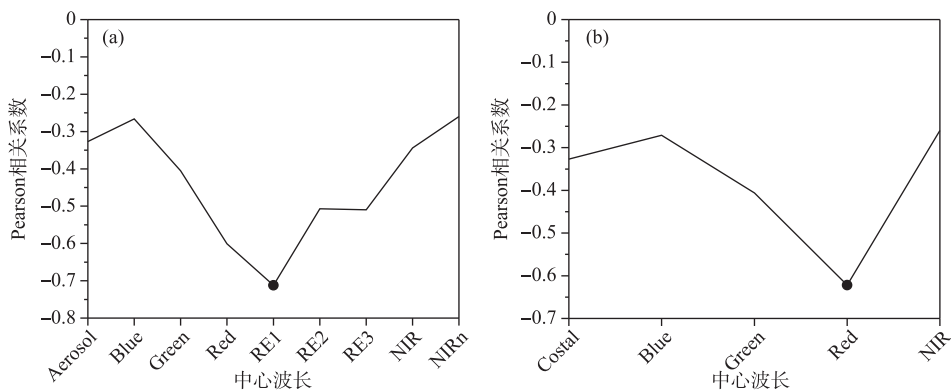


图 5 单波段反射率与水体透明度之间的相关系数: Sentinel-2 MSI 单波段(a); Landsat-8 OLI 单波段(b) (圆点代表 Pearson 相关系数最高的波段位置)

Fig.5 The correlation coefficient between single band reflectance and water transparency: Sentinel-2 MSI single band(a); Landsat-8 OLI single band(b) (The dot represents the band position with max Pearson's correlation coefficients)

图 6a 为 Sentinel-2 MSI 波段比与实测透明度之间的相关性分析. 从图可以看到在 Sentinel-2 MSI 波段 $R_{rs}(490)/R_{rs}(665)$ 处, 即蓝红波段比的皮尔逊系数最高, 为 0.82. 在图 6b 中表示的是 Landsat-8 OLI 波段比与实测透明度之间的相关性, 在 $R_{rs}(483)/R_{rs}(655)$ 处光谱反射率与透明度的相关性最高, 皮尔逊系数为 0.77.

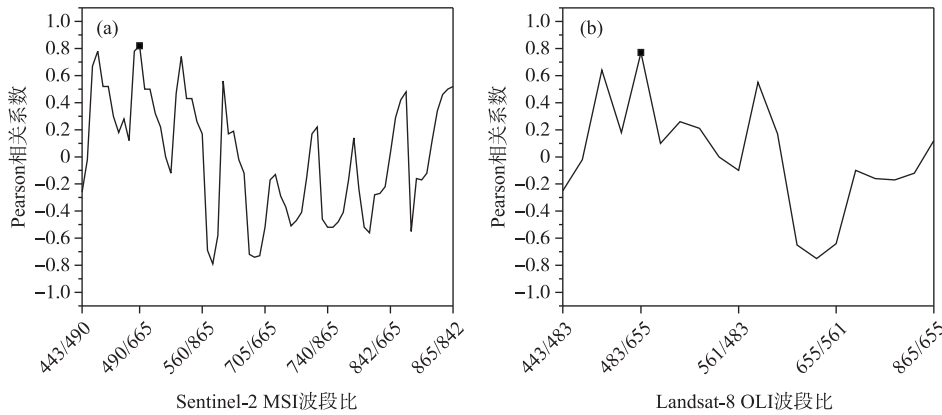


图 6 波段比与水体透明度之间的相关系数: Sentinel-2 MSI 波段比(a); Landsat-8 OLI 波段比(b)
(方形代表 Pearson 相关系数最高的波段位置)

Fig.6 The correlation coefficient between band ratio reflectance and water transparency:
Sentinel-2 MSI band ratio(a); Landsat-8 OLI band ratio (b)
(The square represents band position with max Pearson's correlation coefficients)

3.2 透明度经验算法

基于相关分析的结果,本文选取 $R_{rs}(705)$ 、 $R_{rs}(655)$ 、 $R_{rs}(490)/R_{rs}(665)$ 和 $R_{rs}(483)/R_{rs}(655)$ 作为模型变量,试图建立透明度经验算法. 利用 165 组透明度和遥感反射率数据,建立了透明度经验模型. 采用最小二乘法确定了模型参数. 建立的模型包括单波段模型、波段比模型和波段组合模型,见表 2. 从表中可以看出,针对 MSI 数据,反演精度最好的模型为波段比二次模型, $R^2=0.66$, $RMSE=24.02$ cm, $MAPE=21.24\%$. 针对 OLI 数据,反演精度最好的模型为波段比二次模型, $R^2=0.61$, $RMSE=25.52$ cm, $MAPE=29.05\%$. 波段比值在一定程度上减少大气背景环境和太阳光照对电磁波的影响,因此比值算法作为常用算法来反演水质参数^[40].

剩余 55 组数据用于检验模型精度,检验结果显示,针对 MSI 传感器的模型精度, $R^2=0.64$, $RMSE=24.71$ cm, $MAPE=28.65\%$; 针对 OLI 传感器的模型精度, $R^2=0.56$, $RMSE=27.02$ cm, $MAPE=29.06\%$. 表明本文建立的经验模型反演精度较高,可以很好地反演岱海水体的透明度.

表 2 水体透明度反演模型
Tab.2 Water transparency retrieved models

数据	模型类型	模型公式	R^2	$RMSE/cm$	$MAPE/\%$
MSI	波段比二次	$\ln SD = -3.73(R_{rs}(490)/R_{rs}(665))^2 + 10.85 R_{rs}(490)/R_{rs}(665) - 2.96$	0.66	24.02	21.24
	波段比一次	$\ln SD = 2.89R_{rs}(490)/R_{rs}(665) + 2.89$	0.59	27.24	24.59
	单波段二次	$\ln SD = -1837.27R_{rs}(705)^2 - 57.71 R_{rs}(705) + 5.17$	0.51	28.75	26.19
	单波段一次	$\ln SD = -106.77R_{rs}(705) + 5.43$	0.50	29.05	26.24
	混合波段	$\ln SD = -49.82R_{rs}(705) + 1.82 R_{rs}(490)/R_{rs}(665) + 2.84$	0.63	25.49	21.07
	波段比二次	$\ln SD = -4.87(R_{rs}(483)/R_{rs}(655))^2 + 11.54R_{rs}(483)/R_{rs}(655) - 1.97$	0.61	25.52	29.05
OLI	波段比一次	$\ln SD = 2.88R_{rs}(483)/R_{rs}(655) + 1.76$	0.57	27.79	31.92
	单波段二次	$\ln SD = -3943.03R_{rs}(655)^2 + 29.78 R_{rs}(655) + 4.73$	0.39	32.11	33.84
	单波段一次	$\ln SD = -89.01R_{rs}(655) + 5.51$	0.31	35.03	36.65
	混合波段	$\ln SD = -42.13R_{rs}(655) + 2.48R_{rs}(483)/R_{rs}(655) + 2.56$	0.58	27.91	23.98
	波段比二次				

3.3 不同算法透明度反演结果对比

将本文建立的最优模型与其他已有的模型进行对比(图7):QAA算法^[9]反演的透明度与实测透明度的 $R^2=0.44$, $RMSE=37.12$ cm, $MAPE=32.08\%$;QAA_hybrid^[10]算法反演的透明度与实测透明度的 $R^2=0.06$, $RMSE=40.09$ cm, $MAPE=65.59\%$,由此可得,利用以上两个半分析模型反演岱海水体的透明度时存在一定的不确定性.除了SD_{MSI}算法之外,其它模型^[13,18,41-44]都存在很大的误差($R^2<0.66$, $RMSE>24.02$ cm, $MAPE>21.42\%$).SD_{MSI}模型得到的结果与本文模型相近,原因是该模型在选取变量时与本文模型的变量相同,都为蓝红波段比,且其中的B5波段与本文敏感的单波段一致.模型有差距是因为本文模型没有用B4单波段,并且SD_{MSI}模型中的单波段无法消除误差.

综上所述,本文建立的MSI波段比二次模型比其他算法更适用于反演岱海水体的透明度,而其他算法出现较大误差的原因是岱海的水体光学特性不同于其他区域的水体,经验算法针对不同研究区都需要建立适合于研究区水体的算法,这样反演出的水体透明度值更加接近实测值.

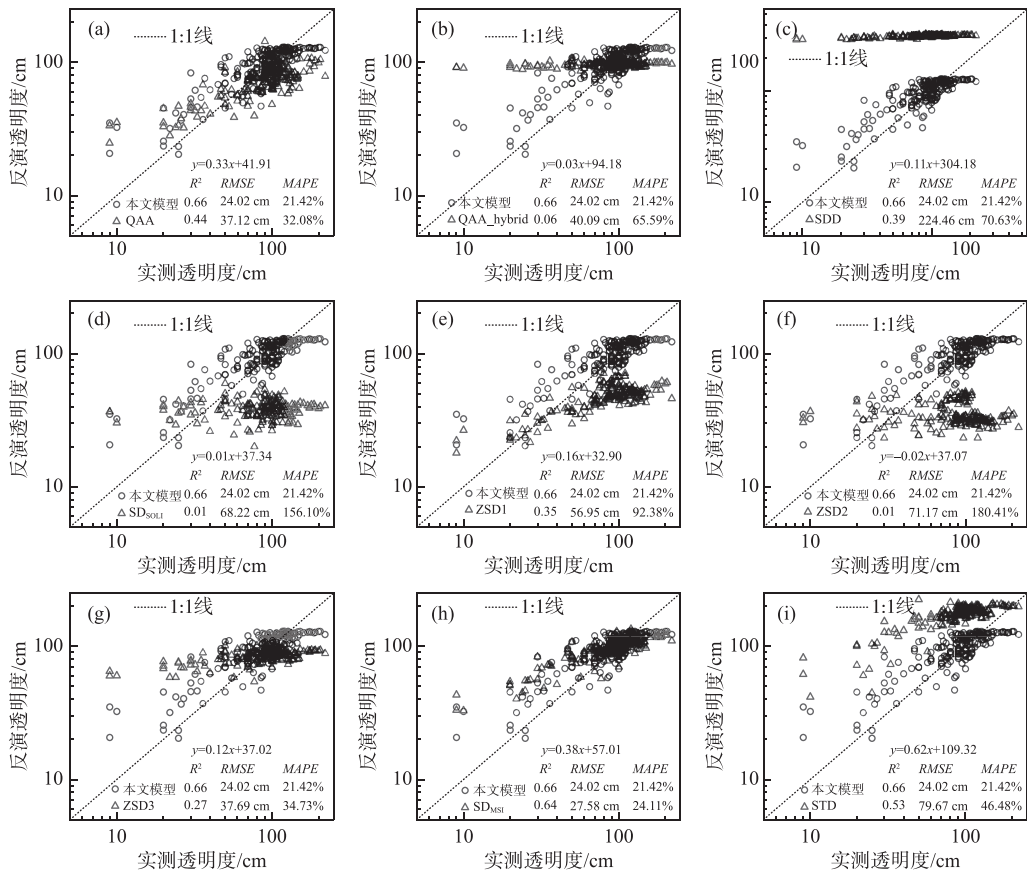


图7 本文建立的模型与其他算法的对比:(a)QAA算法;(b)QAA_hybrid算法;(c)SDD模型;(d)SD_{SoLI}模型;(e)ZSD1模型;(f)ZSD2模型;(g)ZSD3模型;(h)SD_{MSI}模型;(i)STD模型

Fig.7 Comparison of the model established in this study with other algorithms:

(a) QAA algorithm; (b) QAA_hybrid algorithm; (c) SDD model; (d) SD_{SoLI} model; (e) ZSD1 model; (f) ZSD2 model; (g) ZSD3 model; (h) SD_{MSI} model; (i) STD model

3.4 透明度经验算法的遥感应用

3.4.1 反演的透明度结果验证 利用2020年8月24日和2020年10月12日的实测透明度数据,检验了MSI和OLI数据反演得到的透明度结果,见图8.可以看出,利用MSI和OLI数据反演透明度,均得到了较好的结

果. 实测值与反演值分布于 1:1 线附近, 平均相对百分比误差分别为 28.82% 和 26.97%, 均方根误差分别为 23.26 和 15.46 cm ($R^2=0.83$ 和 $R^2=0.88$), 说明反演效果较好.

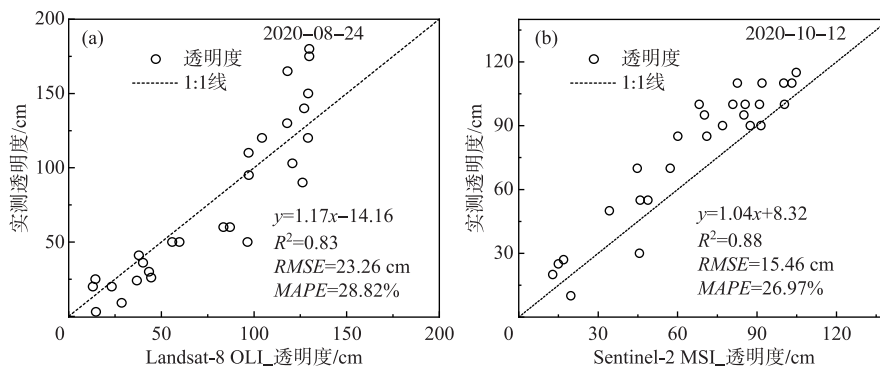


图 8 透明度反演结果验证: 实测透明度与 Landsat-8 OLI(a) 和 Sentinel-2 MSI(b) 反演透明度对比

Fig.8 Water transparency inversion result verification: Comparison of measured water transparency and Landsat-8 OLI retrieved (a), Sentinel-2 MSI retrieved(b)

根据 2019 年 4 月 16 日同一天的 MSI 和 OLI 影像数据反演岱海水体透明度分布, 二者的反演结果大致相同, 都是在岱海的东部透明度偏低, 中部和西部透明度较高. 利用 2019 年 4 月 16 日的 MSI 与 OLI 进行交叉验证, 验证结果(图 9)为 $R^2=0.89$, $RMSE=7.51$ cm, $MAPE=5.85\%$. 说明 MSI 和 OLI 数据在反演水体透明度方面有很好的 consistency.

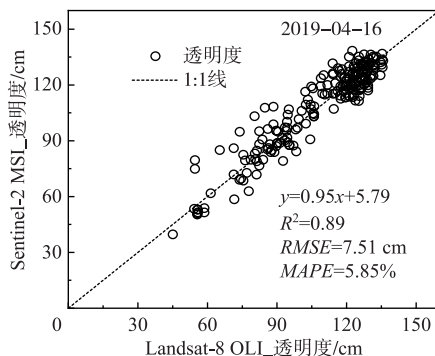


图 9 Sentinel-2 MSI 与 Landsat-8 OLI 水体透明度的交叉验证

Fig.9 Cross-calibration of Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI of water transparency

3.4.2 岱海水体透明度时空变化分析 由岱海 220 组实测数据可知, 测量得到的透明度范围是 3~220 cm, 平均值和标准差分别为 92.31 和 40.54 cm. 然而由于气象和人为因素干扰, 岱海水体光学性质时空变化特征复杂. 因此, 本文利用时间序列 Landsat-8 OLI 和 Sentinel-2 MSI 遥感影像, 得到了 2013—2020 年岱海透明度年平均空间分布图(图 10)以及月平均空间分布图(图 11).

从 2013—2020 年平均透明度空间分布可以明显地看出, 岱海水体透明度在 2013 年较低, 低值主要分布在湖中的东南部和中部; 2014、2015 和 2019 年水体透明度值在湖的西部偏高, 东部出现低值; 2016 年中部和东部的值偏低; 2017 年在湖中部的值偏高, 边缘较低; 2018 年西北部出现高值, 其余部分的透明度值较低; 2020 年水体透明度在整个湖中分布较均匀(图 10). 根据 2013—2020 年岱海水体透明度年平均统计, 得出岱海的时间变化特征: 水体 8 年内年平均透明度范围在 90.71~120.77 cm 之间, 在 2015 年岱海的水体透明度达到最高, 为 120.77 cm; 2013 年平均水体透明度最低, 为 90.71 cm; 岱海水体透明度总体在波动中呈下

降趋势,并且下降速度很小。

从图 11 可以看出岱海水体在 2013—2020 年的月平均透明度的空间分布,4 月和 6 月的岱海水体透明度东部偏低,中西部偏高;5 月水体透明度整体的值偏低;7 月岱海透明度表现为中部和西部较高,其余部分较低;8 月透明度整体较高;9 月表现为东北部和西南部的透明度值比其他区域高;10 月岱海水体透明度东部和南部偏低,西部偏高。根据 2013—2020 年中 4—10 月岱海水体透明度平均统计,可以得出岱海月平均透明度的范围在 90.68~122.53 cm,透明度最高的月份是 7 月,为 122.53 cm;最低值在 5 月,为 90.68 cm。总体上,4—10 月的平均透明度呈上升趋势。根据年平均和月平均水体透明度的反演结果,分析其空间分布特征,可以看出在不同的时间尺度上,透明度的空间分布特征不同,针对透明度值高低不同的情况,对湖中选取的区域进行了进一步研究。

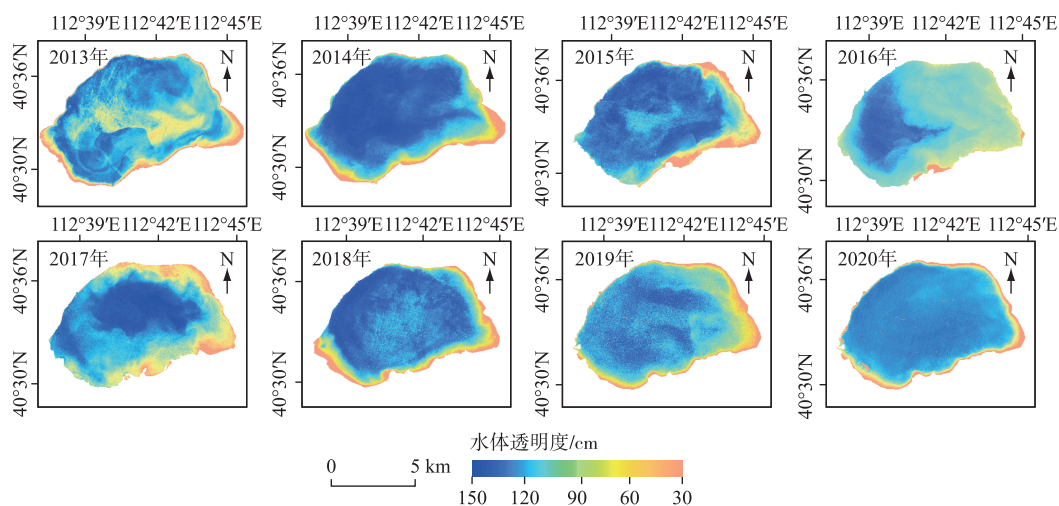


图 10 2013—2020 年岱海水体年平均透明度空间分布

Fig.10 Annual averaged spatial distribution of the water transparency of Lake Daihai from 2013 to 2020

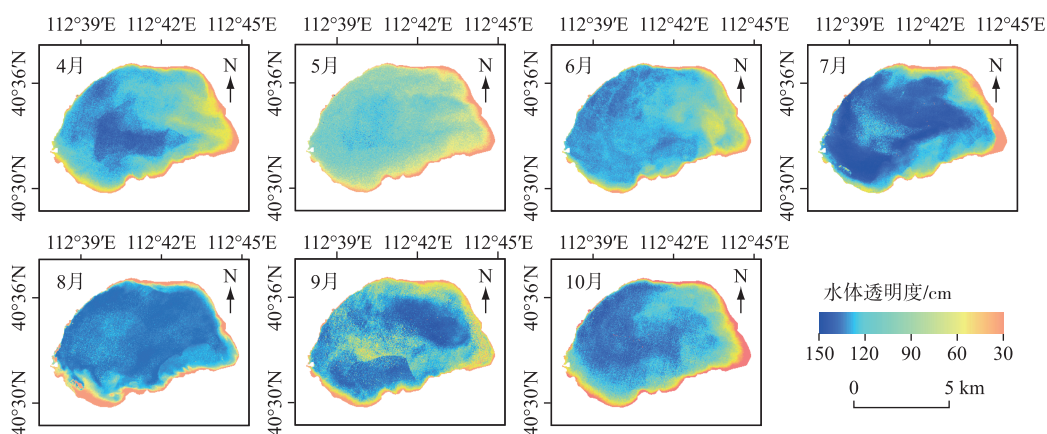


图 11 2013—2020 年岱海水体透明度月平均空间分布

Fig.11 Monthly averaged spatial distribution of the water transparency of Lake Daihai from 2013 to 2020

根据 8 个区域水体的透明度值,统计了每个区域年平均(2013—2020 年)透明度(图 12)和月平均(4—10 月)透明度(图 13)。A~H 区在 2013—2020 年的年平均透明度趋势见图 12a。2013—2017 年,8 个区域的

走势相同, 2013—2015 年呈上升趋势, 形成峰值, 2015—2016 年呈下降趋势, 2016—2017 年呈上升趋势. 2017—2020 年总体上在波动中呈下降趋势. 图 12b 为 8 个样区在 2013—2020 年总的年平均透明度, 透明度在 102.02~116.30 cm 之间, A 区(岱海旅游景点入口)的平均透明度最高, 为 116.30 m; E 区(天成河入口)的平均透明度最低, 为 102.02 cm.

A~H 区在 2013—2020 年 4—10 月的月平均透明度(图 13a)总体上呈先上升, 后下降的趋势, 除了 C 区(五号河入口)在 8 月下降且速度较快, 在 7—9 月, 每个区域的升降趋势各有不同. 8 个样区在 2013—2020 年内总的月平均透明度, 见图 13b. 它们的透明度在 101.02~114.54 cm 之间, A 区(岱海旅游景点入口)的平均透明度为 114.54 cm, 在 8 个区域中最高; F 区(目花河入口处)的平均透明度为 101.02 cm, 为 8 个区域中最低.

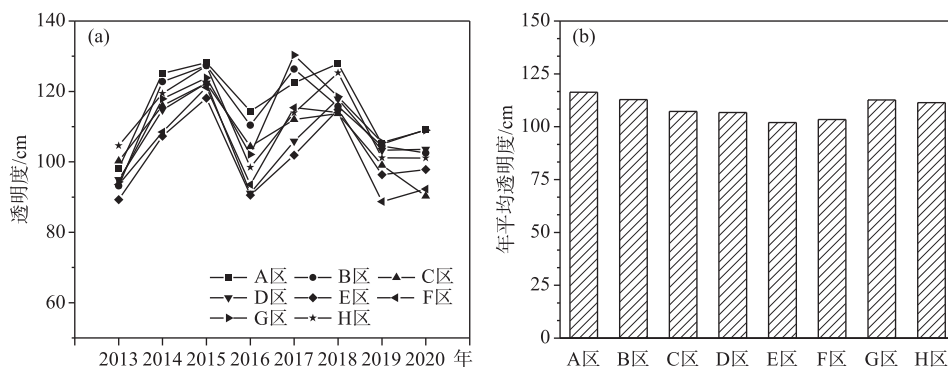


图 12 A~H 区在 2013—2020 年的平均透明度:

8 个区域每年平均透明度及变化趋势(a); 每个区域在 8 年内总的平均透明度(b)

Fig.12 Average transparency of A-H zones in 2013-2020: Annual averaged transparency and changing trend in 8 regions(a); Total averaged transparency of each region in 8 years(b)

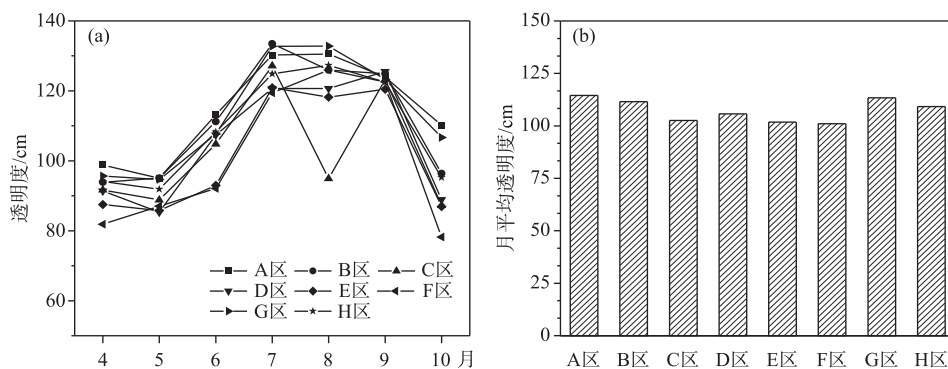


图 13 A~H 区在 2013—2020 年中 4—10 月的平均透明度:

8 个区域每月平均透明度及变化趋势(a); 每个区域在 8 年内总的月平均透明度(b)

Fig.13 Monthly transparency of A-H zone from April to October, 2013-2020: Monthly averaged transparency and changing trends in 8 regions(a); Total monthly average transparency of each region in 8 years(b)

3.5 岱海透明度的影响因素分析

水体透明度的时空变化受多种因素影响, 例如风速、降水量和地理位置等^[45-46], 不同湖泊中的水体, 所受影响因素不同. 本文利用 2013—2020 年岱海(凉城县气象站)月平均风速和月累计降水量数据, 用于分析这两个参数对透明度的影响, 从图 14 中可以看出, 透明度和降水量的趋势大致相同, 都是 4—6 月缓慢上

升,然后快速上升到7月,形成峰值,8—10月为下降趋势.总体上的趋势呈先上升,后下降.风速在4月最高,一直下降到8月,形成最低值,9月和10月风速匀速上升,因此,水体的透明度与风速的变化趋势相反.从图15a中可以看出,水体透明度与风速呈显著负相关, R 为 -0.84 ,即风速越大,水体的透明度越低,风速小,水体透明度变高.因为高风速会引起湖中泥沙的再悬浮,导致透明度值降低^[47].在图15b中可以看出,水体透明度与降水量呈显著正相关, R 为 0.83 ,即随着降水量的增多,水体的透明度会变高,可能的原因是降水在一定程度上对湖水起到稀释作用.

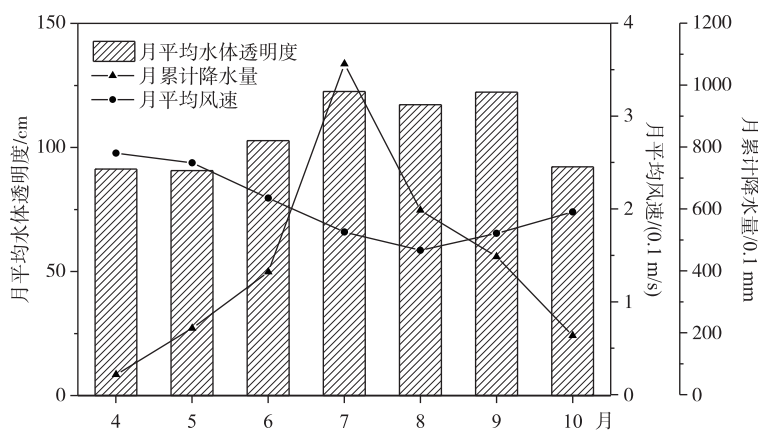


图 14 水体透明度与风速和降水量的变化趋势

Fig.14 The change trend of water transparency, wind speed, precipitation

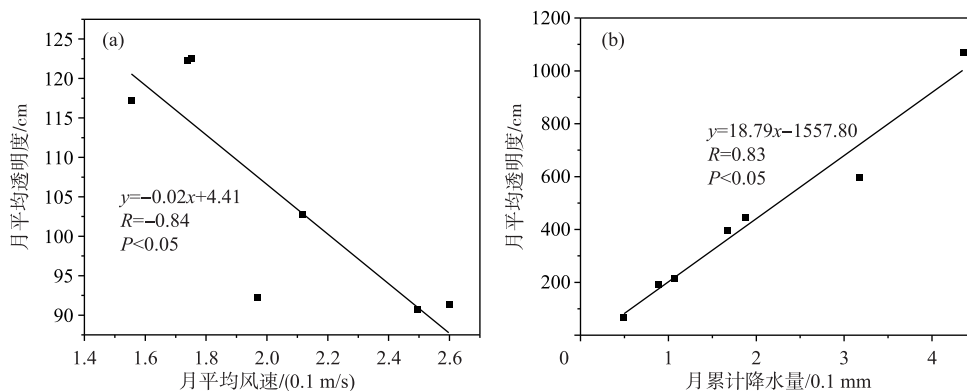


图 15 水体透明度与风速(a)和降水量(b)的关系

Fig.15 The relationship between water transparency and wind speed(a), precipitation(b)

4 结论

本文利用实测光谱数据和透明度数据,建立了适合于岱海水体透明度的经验模型,并对经验模型进行精度检验.然后,将算法应用于 Sentinel-2 MSI 和 Landsat-8 OLI 数据,分析了 2013—2020 年岱海水体透明度时空分布特征,并讨论了透明度变化的影响因素,具体结论如下:

1) 本文针对 Sentinel-2 MSI 和 Landsat-8 OLI 卫星数据的波段设置,建立了透明度经验模型并且经过检验,蓝红波段比二次模型的反演结果最好(MSI: $R^2 = 0.64$, $RMSE = 24.71$ cm, $MAPE = 28.65\%$; OLI: $R^2 = 0.56$, $RMSE = 27.02$ cm, $MAPE = 29.06\%$).

2) 将蓝红波段比二次模型应用于 Sentinel-2 MSI 和 Landsat-8 OLI 卫星数据,反演得到了透明度.利用实

测透明度数据检验的结果表明,遥感反演结果较好, *MAPE* 优于 28.82%, *RMSE* 低于 23.26 cm, R^2 高于 0.83. 与其他主流算法的对比结果也说明了本文建立的算法适用于岱海水体透明度的遥感反演.

3) 通过时间序列 MSI 和 OLI 得到了岱海 2013—2020 年水体透明度的时空分布图. 时间上, 年平均透明度范围在 90.71~120.77 cm 之间, 2015 年的平均透明度最高, 2013 年的平均透明度最低; 4—10 月的月平均变化范围在 90.68~122.53 cm, 7 月平均透明度最高, 5 月的平均透明度最低. 空间上, 岱海的透明度分布大致表现出西北高, 东南低, 中部高, 四周低的现象.

4) 岱海的透明度时空变化与风速呈显著负相关关系, 与降水量呈显著正相关关系.

5) 本文得到的透明度反演结果存在一定的不确定性, 主要体现在: 实测数据与遥感数据的时间和空间尺度不一致. 有些月份的影像数据较少, 可能会对结果产生一定的影响. 在进一步的研究中, 需要结合其他遥感数据(如高分卫星数据), 展开更为深入的研究.

5 附录

附表 I 和 II 见电子版(DOI: 10.18307/2021.0410).

6 参考文献

- [1] Wang XW, Gong P, Zhao YY *et al.* Water-level changes in China's large lakes determined from ICESat/GLAS data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **132**: 131-144. DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.005.
- [2] Wernand MR. On the history of the secchi disc. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2010, **5**: 10013s. DOI: 10.2971/jeos.2010.10013s.
- [3] Yu DF, Xing QG, Shi P. Study on remote sensing estimate model of transparency of seawater in Sishili Bay, China. *Marine Environmental Science*, 2013, **32**(1): 79-82. [禹定峰, 邢前国, 施平. 四十里湾透明度的遥感估测模型研究. 海洋环境科学, 2013, **32**(1): 79-82.]
- [4] Kloiber SM, Brezonik PL, Olmanson LG *et al.* A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multi-spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **82**(1): 38-47. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00022-6.
- [5] Olmanson LG, Bauer ME, Brezonik PL. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(11): 4086-4097. DOI: 10.1016/j.rse.2007.12.013.
- [6] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(2): 361-369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
- [7] Yin ZY, Jiang T, Yang GP *et al.* The spatial-temporal variation of water clarity and its influencing factors in Jiaozhou Bay from 1986 to 2017. *Marine Sciences*, 2020, **44**(4): 21-32. DOI: 10.11759/hyxx201909090001. [殷子瑶, 江涛, 杨广普等. 1986—2017 年胶州湾水体透明度时空变化及影响因素研究. 海洋科学, 2020, **44**(4): 21-32.]
- [8] Doron M, Babin M, Hembise O *et al.* Ocean transparency from space: Validation of algorithms estimating Secchi depth using MERIS, MODIS and SeaWiFS data. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(12): 2986-3001. DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.019.
- [9] Lee Z, Shang SL, Hu CM *et al.* Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **169**: 139-149. DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.002.
- [10] Jiang DL, Matsushita B, Setiawan F *et al.* An improved algorithm for estimating the Secchi disk depth from remote sensing data based on the new underwater visibility theory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, **152**: 13-23. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.04.002.
- [11] Ma JH, Song KS, Shao TT *et al.* Comparison of water transparency retrieving of lakes in the mid-east part of Jilin Province based on HJ-CCD and MODIS imagery. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3): 661-668. DOI: 10.18307/2016.0323. [马建行, 宋开山, 邵田田等. 基于 HJ-CCD 和 MODIS 的吉林省中西部湖泊透明度反演对比. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 661-668.]
- [12] He XQ, Pan DL, Bai Y *et al.* Recent changes of global ocean transparency observed by SeaWiFS. *Continental Shelf Research*, 2017, **143**: 159-166. DOI: 10.1016/j.csr.2016.09.011.
- [13] Wu GF, De Leeuw J, Skidmore AK *et al.* Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo-spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve, China. *International Journal of Remote Sensing*,

- 2008, **29**(8): 2183-2198. DOI: 10.1080/01431160701422254.
- [14] Fabricius KE, Logan M, Weeks SJ *et al.* Changes in water clarity in response to river discharges on the Great Barrier Reef continental shelf; 2002–2013. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, **173**: A1-A15. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.03.001.
- [15] Shen M, Duan HT, Cao ZG *et al.* Sentinel-3 OLCI observations of water clarity in large lakes in Eastern China: Implications for SDG 6.3.2 evaluation. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **247**: 111950. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111950.
- [16] Luis KMA, Rheuban JE, Kavanaugh MT *et al.* Capturing coastal water clarity variability with Landsat 8. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **145**: 96-104. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.04.078.
- [17] Setiawan F, Matsushita B, Hamzah R *et al.* Long-term change of the secchi disk depth in lake maninjau, Indonesia shown by landsat TM and ETM+ data. *Remote Sensing*, 2019, **11**(23): 2875. DOI: 10.3390/rs11232875.
- [18] Bonansea M, Ledesma M, Bazán R *et al.* Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 imagery for water clarity assessment in a reservoir. *Journal of South American Earth Sciences*, 2019, **95**: 102265. DOI: 10.1016/j.jsames.2019.102265.
- [19] Wang SH, Bai MX, Chen JY *et al.* Research on the ecological protection and restoration of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in typical farming-pastoral ecotone; Taking Daihai Lake Basin in Inner Mongolia as an example. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, **9**(5): 515-519. [王书航, 白妙馨, 陈俊伊等. 典型农牧交错带山水林田湖草生态保护修复——以内蒙古岱海流域为例. 环境工程技术学报, 2019, **9**(5): 515-519.]
- [20] Liu XL. Dynamic change of area and water level of Daihai lake and its driving force analysis[Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019. [刘旭隆. 岱海湖泊面积与水位动态变化及其驱动力分析[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.]
- [21] Chen HY, An LJ, Zhang JL. Characteristics of water surface area evolution and correlation analysis with meteorological factors in Bohai lake. *Environmental Science and Management*, 2018, **43**(12): 62-65. [陈海英, 安莉娟, 张锦龙. 岱海湖水面积演变特征及与气象因子关联度分析研究. 环境科学与管理, 2018, **43**(12): 62-65.]
- [22] Ma F, Feng JC. Effects of human activities on Daihai lake Inner Mongolia. *Journal of MinZu University of China: Natural Sciences Edition*, 2017, **26**(1): 77-83. [马芳, 冯金朝. 人类活动对内蒙古岱海湖影响. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2017, **26**(1): 77-83.]
- [23] Huang Y. Analysis of the area change of the Daihai Lake from 2015 to 2018 and its climate impact. *Modern Agriculture*, 2019, (12): 108-109. [皇彦. 2015—2018年岱海水体面积变化及其气候影响分析. 现代农业, 2019, (12): 108-109.]
- [24] Zhang N, Chen XT, Li HB *et al.* Effect of warm water discharge on addition evaporation of surface of Daihai lake. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, **26**(4): 18-21, 28. [张楠, 陈孝田, 李皓冰等. 岱海湖温排水对湖面附加蒸发量影响研究. 水资源与水工程学报, 2015, **26**(4): 18-21, 28.]
- [25] Tang JW, Tian GL, Wang XY *et al.* The methods of water spectra measurement and analysis I: Above-water method. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8**(1): 37-44. [唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法. 遥感学报, 2004, **8**(1): 37-44.]
- [26] Lee Z, Ahn YH, Mobley C *et al.* Removal of surface-reflected light for the measurement of remote-sensing reflectance from an above-surface platform. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26313-26324.
- [27] Bukata RP, Jerome JH, Bruton JE. Relationships among secchi disk depth, beam attenuation coefficient, and irradiance attenuation coefficient for great lakes waters. *Journal of Great Lakes Research*, 1988, **14**(3): 347-355. DOI: 10.1016/S0380-1330(88)71564-6.
- [28] Drusch M, Del Bello U, Carlier S *et al.* Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **120**: 25-36. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.
- [29] Tyler AN, Hunter PD, Spyarakos E *et al.* Developments in Earth observation for the assessment and monitoring of inland, transitional, coastal and shelf-sea waters. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 1307-1321. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.020.
- [30] Pahlevan N, Sarkar S, Franz BA *et al.* Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **201**: 47-56. DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.033.
- [31] Vanhellefont Q, Ruddick K. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. *Remote Sensing*

- of *Environment*, 2014, **145**: 105-115. DOI: 10.1016/j.rse.2014.01.009.
- [32] Pahlevan N, Schott JR, Franz BA *et al.* Landsat 8 remote sensing reflectance (Rrs) products: Evaluations, intercomparisons, and enhancements. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **190**: 289-301. DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.030.
- [33] Main-Knorn M, Pflug B, Debaecker V *et al.* Calibration and validation plan for the l2a processor and products of the sentinel-2 mission. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, **XL-7/W3**: 1249-1255. DOI: 10.5194/isprsarchives-xl-7-w3-1249-2015.
- [34] Mayer B, Kylling A. Technical note; The libRadtran software package for radiative transfer calculations-description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(7): 1855-1877. DOI: 10.5194/acp-5-1855-2005.
- [35] Huo J, Lu DR. Characteristics and distribution of all-sky radiance by libradtran modeling: For cloud determination algorithm in all-sky images. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, **64**(1): 31-38. [霍娟, 吕达仁. 晴空与有云大气辐射分布的数值模拟及其对全天空图像云识别的应用. 气象学报, 2006, **64**(1): 31-38.]
- [36] Su W, Zhang MZ, Jiang KP *et al.* Atmospheric correction method for sentinel-2 satellite imagery. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(1): 0128001. DOI: 10.3788/AOS201838.0128001. [苏伟, 张明政, 蒋坤萍等. Sentinel-2 卫星影像的大气校正方法. 光学学报, 2018, **38**(1): 0128001.]
- [37] Zhang XY, Li LL, Wang Y *et al.* Atmospheric correction method of GF-1 data based on Landsat8 product algorithm flow. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(1): 182-192. [张晓月, 李琳琳, 王莹等. 采用 Landsat8 产品算法流程的高分一号数据大气校正. 农业工程学报, 2020, **36**(1): 182-192.]
- [38] Aas E, Høkedal J, Sørensen K. Secchi depth in the Oslofjord-Skagerrak area; Theory, experiments and relationships to other quantities. *Ocean Science*, 2014, **10**(2): 177-199. DOI: 10.5194/os-10-177-2014.
- [39] Zhou YK, Iang JH, Huang Q *et al.* Analysis on the trophic status of the Daihai lake in Inner Mongolia. *Arid Land Geography*, 2006, **29**(1): 42-46. [周云凯, 姜加虎, 黄群等. 内蒙古岱海水体营养状况分析. 干旱区地理, 2006, **29**(1): 42-46.]
- [40] Kim SH, Yang CS, Ouchi KZ. Spatio-temporal patterns of Secchi depth in the waters around the Korean Peninsula using MODIS data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, **164**: 172-182. DOI: 10.1016/j.ecss.2015.07.003.
- [41] Bohn VY, Carmona F, Rivas R *et al.* Development of an empirical model for chlorophyll-a and Secchi Disk Depth estimation for a Pampean shallow lake (Argentina). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2018, **21**: 183-191. DOI: 10.1016/j.ejrs.2017.04.005.
- [42] Page BP, Olmanson LG, Mishra DR. A harmonized image processing workflow using Sentinel-2/MSI and Landsat-8/OLI for mapping water clarity in optically variable lake systems. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **231**: 111284. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111284.
- [43] Ren J, Zheng Z, Li Y *et al.* Remote observation of water clarity patterns in Three Gorges Reservoir and Dongting Lake of China and their probable linkage to the Three Gorges Dam based on Landsat 8 imagery. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 1554-1566. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.036.
- [44] Giardino C, Pepe M, Brivio PA *et al.* Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *Science of the Total Environment*, 2001, **268**(1-3): 19-29. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00692-6.
- [45] Gomes AC, Alcântara E, Rodrigues T *et al.* Satellite estimates of euphotic zone and Secchi disk depths in a colored dissolved organic matter-dominated inland water. *Ecological Indicators*, 2020, **110**: 105848. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105848.
- [46] Zeng S, Lei SH, Li YM *et al.* Retrieval of secchi disk depth in turbid lakes from GOCI based on a new semi-analytical algorithm. *Remote Sensing*, 2020, **12**(9): 1516. DOI: 10.3390/rs12091516.
- [47] Wang C, Zhang WM, Wang PF *et al.* Effect of submerged vegetation on the flowing structure and the sediment resuspension under different wind-wave movement conditions. *Journal of Safety and Environment*, 2014, **14**(2): 107-111. [王超, 张微敏, 王沛芳等. 风浪扰动条件下沉水植物对水流结构及底泥再悬浮的影响. 安全与环境学报, 2014, **14**(2): 107-111.]

附表 I 本文所用的影像数据
Attached Tab. I The satellite images used in this study

日期	传感器	日期	传感器	日期	传感器
2013 年 6 月 2 日	OLI	2017 年 9 月 17 日	OLI	2019 年 10 月 25 日	OLI
2013 年 9 月 6 日	OLI	2018 年 5 月 31 日	OLI	2020 年 4 月 2 日	OLI
2013 年 10 月 24 日	OLI	2018 年 9 月 20 日	OLI	2020 年 4 月 30 日	MSI
2014 年 4 月 2 日	OLI	2018 年 10 月 6 日	OLI	2020 年 5 月 15 日	MSI
2014 年 5 月 20 日	OLI	2019 年 4 月 16 日	OLI	2020 年 6 月 9 日	MSI
2014 年 8 月 24 日	OLI	2019 年 4 月 16 日	MSI	2020 年 6 月 14 日	MSI
2014 年 9 月 25 日	OLI	2019 年 4 月 21 日	MSI	2020 年 7 月 19 日	MSI
2015 年 5 月 7 日	OLI	2019 年 5 月 2 日	OLI	2020 年 7 月 23 日	OLI
2015 年 6 月 8 日	OLI	2019 年 5 月 11 日	MSI	2020 年 8 月 24 日	OLI
2015 年 10 月 30 日	OLI	2019 年 5 月 21 日	MSI	2020 年 8 月 28 日	MSI
2016 年 4 月 7 日	OLI	2019 年 7 月 25 日	MSI	2020 年 10 月 2 日	MSI
2016 年 4 月 23 日	OLI	2019 年 8 月 6 日	OLI	2020 年 10 月 7 日	MSI
2016 年 7 月 28 日	OLI	2019 年 9 月 18 日	MSI	2020 年 10 月 12 日	MSI
2016 年 9 月 14 日	OLI	2019 年 9 月 23 日	MSI	2020 年 10 月 17 日	MSI
2016 年 9 月 30 日	OLI	2019 年 9 月 28 日	MSI	2020 年 10 月 22 日	MSI
2017 年 7 月 31 日	OLI	2019 年 10 月 8 日	MSI		

附表 II 其他算法与本文算法的透明度反演结果
Attached Tab. II Transparency retrieved results of other algorithms and this study algorithm

来源	模型公式	R^2	$RMSE/cm$	$MAPE/\%$
Lee et al. (2015) ^[9]	$SD = \frac{1}{2.5 \min(k_d(443, 490, 510, 560, 620, 665))} \ln\left(\frac{ 0.14 - R_{rs}^{pc} }{C_t^r}\right)$	0.44	37.12	32.08
Jiang et al. (2019) ^[10]	$Z_{SD} = \frac{1}{(1 + K_T \cdot K_d) \min(K_d(\lambda))} \ln\left(\frac{ 0.14 - R_{rs}^{pc} }{C_t^r}\right)$	0.06	40.09	65.59
Bohn et al. (2018) ^[41]	$SDD = -15.204B_4 + 3.333$	0.39	224.46	70.63
Page et al. (2019) ^[42]	$SD_{SOL} = 0.50 \times \left(\frac{R_{rs}(B2)}{R_{rs}(B4)}\right) - 37.55(R_{rs}(B3)) + 4.84$	0.01	68.22	156.10
Page et al. (2019) ^[42]	$\ln SD_{MSI} = 0.69 \times \left(\frac{R_{rs}(B2)}{R_{rs}(B4)}\right) - 1351.03(R_{rs}(B5) \times R_{rs}(B4)) + 4.06$	0.64	27.58	24.11
Ren et al. (2018) ^[43]	$ZSD1 = 1.7351 \times \exp\left(2.141\left(\frac{R_{rs}(B4)}{R_{rs}(B3)}\right)\right)$	0.35	56.95	92.38
Giardino et al. (2001) ^[44]	$ZSD2 = -0.715 \times \left(\frac{R_{rs}(B2)}{R_{rs}(B3)}\right) + 0.751$	0.01	71.17	180.41
Wu et al. (2008) ^[13]	$ZSD3 = 1.133 - 10.533 \times R_{rs}(B2) - 13.805 \times R_{rs}(B4)$	0.27	37.69	34.73
Bonansea et al. (2019) ^[18]	$STD = 1.79 - 134.15 \times \text{bandRE1} + 157.72 \times \text{bandNIR} + 0.53 \times \frac{\text{bRE3}}{\text{bNIRn}}$	0.53	79.67	46.48
MSI 波段比二次模型	$\ln SD = -3.73 \times \left(\frac{R_{rs}(B2)}{R_{rs}(B4)}\right)^2 + 10.85 \left(\frac{R_{rs}(B2)}{R_{rs}(B4)}\right) - 2.96$	0.66	24.02	21.24
OLI 波段比二次模型	$\ln SD = -4.87 \times \left(\frac{R_{rs}(B2)}{R_{rs}(B4)}\right)^2 + 11.54 \left(\frac{R_{rs}(B2)}{R_{rs}(B4)}\right) - 1.97$	0.61	25.52	29.05