

文章编号: 1672-8785(2017)03-0021-010

基于短波红外波段的乌梁素海 Landsat-8 OLI 数据大气校正

青 松¹ 包玉海^{1,2} 郝艳玲³

(1. 内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古呼和浩特 010022;

2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010022;

3. 内蒙古大学环境与资源学院, 内蒙古呼和浩特 010021)

摘 要: 采用基于短波红外波段的 Vanhellemont 和 Ruddick 算法对乌梁素海水体的 Landsat-8 业务陆地成像仪 (Operational Land Imager, OLI) 数据进行了大气校正。用该算法得到的 OLI 反射率与 ENVI Flaash 大气校正结果之间具有很好的一致性, 且 R^2 为 0.8。经大气校正后得到的 OLI 反射率与实测值吻合得较好, 而且 483 nm、561 nm 和 655 nm 波段的误差在 19.3%~36.5% 之间, 表明该算法适用于乌梁素海水体。基于时间序列 OLI 数据, 得到了悬浮物浓度的时空分布特征。乌梁素海的悬浮物浓度反演结果存在一定的不确定性, 其主要原因是底质、沉水植物和藻华对离水反射率有很大影响。

关键词: 短波红外; Landsat-8; 大气校正; 乌梁素海

中图分类号: TP7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.03.005

Atmospheric Correction of Landsat-8 OLI Data for Wuliangsu Lake Based on SWIR Bands

QING Song¹, BAO Yu-hai^{1,2}, HAO Yan-ling³

(1. College of Geographical Science of Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;

2. Inner Mongolian Key Laboratory of Remote Sensing and Geography Information System,

Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 3. College of Environment

and Resource, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: Atmospheric correction of the data about Wuliangsu Lake from the Operational Land Imager (OLI) onboard Landsat-8 was carried out by using the Vanhellemont & Ruddick algorithm based on shortwave infrared bands. The OLI reflectance derived by this algorithm agreed well with that from the ENVI Flaash model. Its correlation coefficient was 0.8. The OLI reflectance derived after atmospheric correction was well consistent with the measured value. Their errors at the wavelengths of 483 nm, 561 nm and 655 nm were in the range from 19.3% to 36.5%. This showed that this algorithm was suitable for Wuliangsu Lake. On the basis of time series data from the OLI onboard Landsat-8, the temporal and spatial distribution characteristics of suspended particulate matter concentration were obtained. However, there existed some uncertainties in the retrieval result of suspended particulate matter concentration in Wuliangsu Lake. The main reason was that the reflectance from the bottom,

收稿日期: 2016-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61265008); 内蒙古自然科学基金项目 (2012MS0608)

作者简介: 青松 (1982-), 男, 内蒙古通辽人, 副教授, 主要研究方向为光学遥感机理与应用。

E-mail: chrisqs27@126.com

submerged vegetation and algae bloom in the lake had great influences on the water leaving reflectance.

Key words: SWIR; Landsat-8; atmospheric correction; Wuliangsuhai Lake

0 引言

随着定量遥感技术的不断发展,关于地球表面参量的遥感反演研究越来越受到人们的关注。遥感数据的大气校正是准确提取地表参量的前提和重要环节。尤其是在水色遥感研究中,开展高质量的大气校正工作对于水体要素的精确反演至关重要。

在国内外的水色遥感研究中,人们已经提出了多种大气校正方法。其中,基于辐射传输理论的有 MOTRAN 和 6S 等主流算法^[1-6]。然而,此类方法需要实时的大气参数数据,并且计算量大。因此,基于特定波段遥感影像的算法得到了很好的发展。针对一类水体, Gordon H R 等人基于近红外波段的离水辐亮度为零的假设,提出了一种关于大洋水体的大气校正算法^[7-8]。然而,在浑浊水体中,近红外波段的水体反射率不为零,因此该算法在二类水体中得到了进一步的优化,并出现了两种假设:(1) 浑浊水体在近红外波段的反射率的比值为常数;(2) 浑浊水体在短波红外波段的反射率为零。Wang M H 等人提出了一种基于近红外和短波红外波段的算法,并成功开展了浑浊水体 MODIS 数据的大气校正工作^[9-10]。Chen S G 等人检验了近红外-短波红外算法对于中国东海 MODIS 数据的适用性^[11]。He Q J 等人将改进的近红外-短波红外算法应用于珠江口水体的 MODIS 数据^[12]。类似的改进算法还有 Wang M H 等人提出的基于 1640 nm 和 2130 nm 两个短波红外波段的算法、Chen J 等人提出的交叉定标模型以及 Zhang M W 等人提出的迭代算法等^[13-15]。此外,针对缺少短波红外波段的 SeaWiFs 数据,He X Q 等人利用一种基于 412 nm 波段的方法对沿岸水体和内陆湖泊的 SeaWiFs 数据进行了大气校正^[16]。但是 MODIS 等卫星数据的空间分辨率较低(250 m),不适合于小尺度区域的遥感监测。而 Landsat-8 OLI 数据则具有较高的空间分辨率(30 m),更适合于海岸带区域和内陆湖泊水体的监测^[17]。此外,

由于信噪比较高的两个短波红外波段(1609 nm 和 2201 nm)的存在,基于短波红外波段的大气校正算法适用于 OLI 数据。目前,该领域已经出现了 OLI 数据大气校正的相关研究^[18-25]。其中, Vanhellemont Q 和 Ruddick K 等人提出的基于近红外和短波红外波段的算法简单且易于实现,并在比利时的沿岸浑浊水体和泰晤士河口水体中得到了检验^[20-21]。然而,该算法在复杂的内陆湖泊水体中的适用性尚未得到检验。

本文以蒙古高原典型湖泊——乌梁素海为研究区,利用 Vanhellemont 和 Ruddick 大气校正算法来实现研究区 Landsat-8 OLI 数据的大气校正,进而检验该算法在复杂的湖泊水体中的适用性。在此基础上,利用时间序列 OLI 数据反演乌梁素海水体的悬浮物浓度,并对其时空分布特征和影响因素进行分析。

1 研究数据

1.1 研究区

乌梁素海位于 40°46'N ~ 41°08'N 和 108°42'E ~ 108°57'E,属于内蒙古自治区巴彦诺尔市乌拉特前旗(见图 1)。其东西跨度约为 10 km,南北跨度约为 40 km(根据 2013 年的 Landsat-8 OLI 影像),湖水较浅,平均水深约为 1 m。乌梁素海西岸自北向南有总排干、通济渠、八排干、长济渠、九排干、塔布渠和十排干等主要灌溉渠与湖体相连^[26]。受灌区农田退水、工业废水和生活污水的影响,乌梁素海水体遭到严重污染,富营养化程度加剧,导致近几年经常发生黄苔藻华现象。湖区芦苇蔓延,部分湖底长有水草,使得乌梁素海成为大型的草型湖泊。

本文在灌区总排干附近和南部退水闸附近的湖区中选取了两个用于悬浮物浓度时空分布特征分析的样区(见图 1)。

1.2 实测数据

实测数据为 2013 年 10 月 16 日在乌梁素海水域测得的遥感反射率数据。通过质量控制选取 13 个站位数据(见图 1),并将其作为研究区

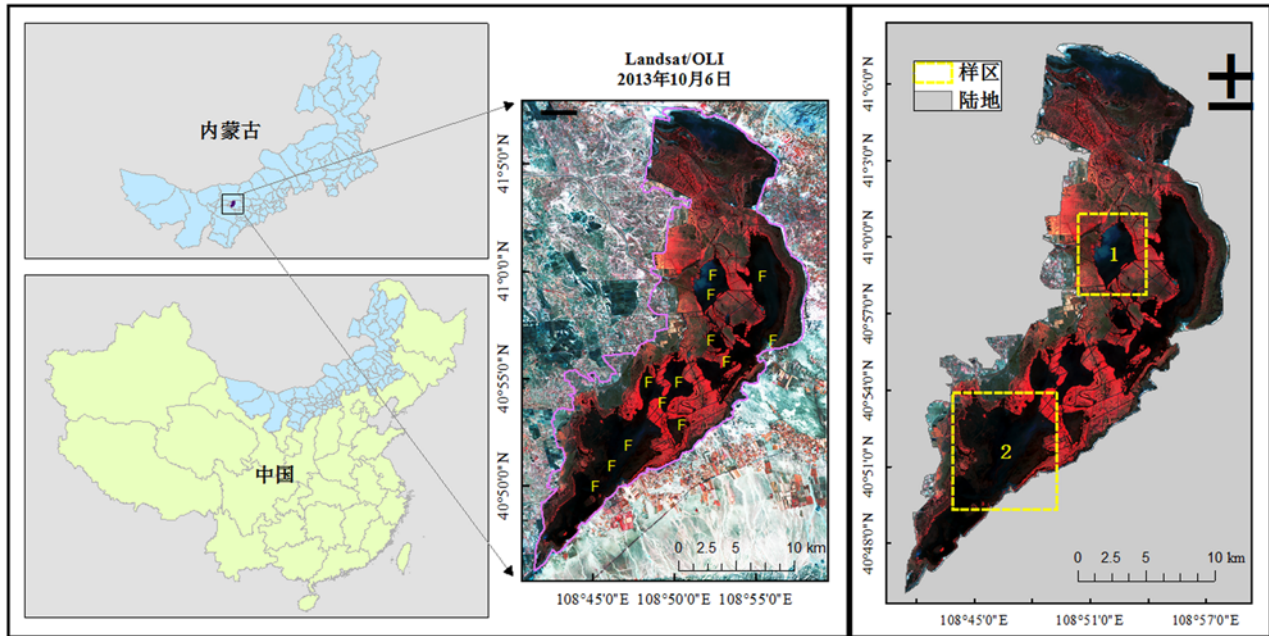


图 1 乌梁素海研究区实测数据的站位图以及选取的两个样区

大气校正结果的检验数据。利用美国 ASD 公司生产的便携式光谱仪测量水体遥感反射率。光谱测量在低风速以及晴朗天气条件下开展。测量观测的方位角和天顶角分别为 135° 和 40° ，以避免发生镜面反射和消除阴影的影响。每个站点测量 3 次，并保留相对误差小于 10% 的站位数据。图 2 所示为遥感反射率光谱曲线。可以看出，12 个站点的光谱曲线形状很相似，但遥感反射率数值大小之间具有明显差异；现场观测中发现站位 1、3 和 5 的悬浮物浓度高，因此在 $440 \sim 700 \text{ nm}$ 范围内的遥感反射率较高；1 个站位（站位 10）的水底长有沉水植物，因此在 700 nm 之后的波段中出现了明显的植被反射峰。

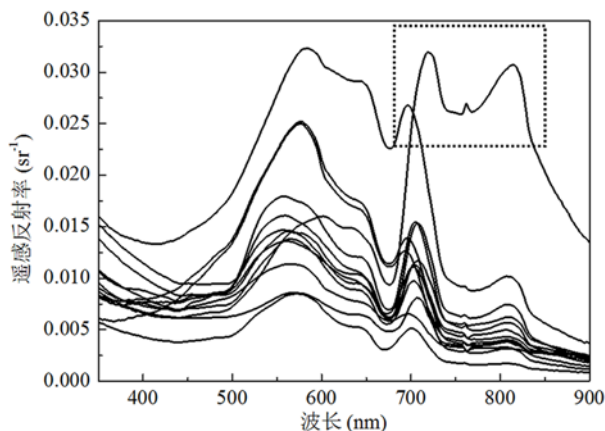


图 2 乌梁素海水体的实测遥感反射率

1.3 遥感数据

Landsat-8 OLI 数据拥有 9 个波段。其中，波段 8 为全色波段，其空间分辨率为 15 m ；其他波段的空间分辨率均为 30 m ；波段 5 为近红外 (NIR) 波段，波段 6 和 7 为短波红外 (SWIR) 波段，可用于 OLI 数据的大气校正（见表 1）。Landsat-8 卫星的重访周期为 16 天，扫描宽度为 185 km ，信噪比比 Landsat TM 和 ETM+ 更高。本文经下载得到乌梁素海 2013 年和 2015 年的 6 景无云雾覆盖的 Landsat-8 数据，轨道号为 128/32（数据名称和成像日期见表 2）。

2 研究方法

2.1 大气校正算法

2.1.1 大气层顶的反射率计算

首先，利用式 (1) 计算大气层顶的辐射亮度：

$$L = aDN + b \quad (1)$$

式中， L 为大气层顶的辐射亮度； DN 为图像灰度值； a 和 b 分别为定标参数，可从 Landsat-8 OLI 元数据中获取。

然后利用式 (2) 将辐射亮度转换为大气层顶的反射率：

表 1 Landsat-8 OLI 数据的波段设置及其对应的 F_0 、 τ_r 和 τ_{oz} 值 (Vanhellemont & Ruddick, 2015)

波段序号	波段 (nm)	中心波长 (nm)	F_0 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)	τ_r	τ_{oz}
1	443 ~ 453	443	1895.6	2.35×10^{-1}	8.79×10^{-4}
2	450 ~ 515	483	2004.6	1.69×10^{-1}	5.87×10^{-3}
3	525 ~ 600	561	1820.7	9.02×10^{-2}	3.14×10^{-2}
4	630 ~ 680	655	1549.4	4.79×10^{-2}	1.82×10^{-2}
5	845 ~ 885	865	951.2	1.55×10^{-2}	6.43×10^{-4}
6	1560 ~ 1660	1609	247.6	1.28×10^{-3}	0
7	2100 ~ 2300	2201	85.5	3.70×10^{-4}	0
8	500 ~ 680	591	1724.0	7.94×10^{-2}	2.66×10^{-2}
9	1360 ~ 1390	1373	367.0	2.40×10^{-3}	0

注: F_0 为波段平均的大气层外太阳辐照度, τ_r 和 τ_{oz} 分别为瑞利光学厚度和臭氧光学厚度

表 2 乌梁素海的 Landsat-8 OLI 图幅名称和成像日期

OLI 影像	成像日期	作图序号
LC81280322013279LGN00	20131006	
LC81280322013295LGN00	20131022	
LC81280322015205LGN00	20150724	a
LC81280322015237LGN00	20150825	b
LC81280322015269LGN00	20150926	c
LC81280322015285LGN00	20151012	d

注: 斜体加粗代表本文所展示的悬浮物浓度遥感反演结果图

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi L d^2}{F_0 \cos \theta_0} \quad (2)$$

式中, ρ_{TOA} 为大气层顶的反射率; d 为日地距离; F_0 为波段平均的大气层外太阳辐照度; θ_0 为太阳高度角。

2.1.2 瑞利校正

水体的大气层顶反射率可以表示为气体分子反射率 (即瑞利反射率)、气溶胶反射率和离水反射率之和:

$$\rho_{TOA} = \rho_r + \rho_a + t\rho_w \quad (3)$$

式中, ρ_r 为气体分子反射率; ρ_a 为气溶胶反射率; ρ_w 为离水反射率; t 为大气透射率。 ρ_r 的计算公式为

$$\rho_r = \tau_r p_r(\theta_0, \theta_v, \Delta\phi)(4 \cos \theta_0 \cos \theta_v)^{-1} \quad (4)$$

式中, τ_r 为瑞利光学厚度; p_r 为瑞利散射分布函数; θ_0 和 θ_v 分别为太阳和卫星的天顶角; $\Delta\phi$ 为太阳和卫星的相对方位角。透射率 t 可表示为

$$t = \exp \left[- \left(\frac{\tau_r}{2} + \tau_{oz} \right) / \cos \theta_0 \right] \quad (5)$$

式中, τ_{oz} 为臭氧光学厚度 (见表 1)。

因此, 通过将 ρ_{TOA} 减去 ρ_r 可以得到经瑞利校正后的反射率 ρ_c :

$$\rho_c = \rho_{TOA} - \rho_r = \rho_a + t\rho_w \quad (6)$$

2.1.3 气溶胶校正

Vanhellemont 和 Ruddick 算法的核心是气溶胶校正。此算法有两个假设: (1) 近红外和短波红外波段的 ρ_w 值为零, 因此在近红外和短波红外波段处, $\rho_a = \rho_c$; (2) 近红外和短波红外波段的气溶胶反射比 ε 为常数, 可表示为

$$\varepsilon^{(S,L)} = \frac{\rho_a^{(S)}}{\rho_a^{(L)}} = \frac{\rho_c^{(S)}}{\rho_c^{(L)}} \quad (7)$$

式中, S 和 L 代表 OLI 数据的近红外和短波红外波段, 对应于波段 5、6 和 7。

由 $\varepsilon^{(S,L)}$ 可以得到第 i 波段的 ε [7]:

$$\varepsilon^{(i,L)} = (\varepsilon^{(S,L)})^{\delta_i} \quad (8)$$

式中, $\delta_i = (L - \lambda_i) / (L - S)$ 。

然后第 i 波段的气溶胶反射率可由式 (9) 计算得到:

$$\rho_a^i = \varepsilon^{(i,L)} \rho_a^L \quad (9)$$

将式 (8) 和式 (9) 代入式 (6), 可以得到 OLI 数据各波段的离水反射率:

$$\rho_w^i = \frac{1}{t^i} \left[\rho_c^i - (\varepsilon^{(S,L)})^{\delta_i} \rho_a^L \right] \quad (10)$$

2.2 算法适用性的检验

Landsat-8 卫星在乌梁素海光谱测量实验当天 (2013 年 10 月 16 日) 没有过境, 因此本文采用以下两种方式对算法适用性进行检验: (1) 利用 ENVI Flaash 大气校正结果检验本文算法的适用性; (2) 利用 2013 年 10 月 16 日的实测光谱数据检验 2013 年 10 月 6 日和 10 月 22 日两景 OLI 数据的大气校正结果 (与光谱测量时间相差 10 天和 6 天)。

首先, 对实测遥感反射率进行波段等效积分处理, 得到 443 nm、483 nm、561 nm、655 nm 和 865 nm 五个波段的离水反射率。式 (11) 为波段有效积分的运算公式:

$$\rho = \frac{\sum_{\lambda} \rho(\lambda) F(\lambda)}{\sum_{\lambda} F(\lambda)} \quad (11)$$

其次, 从大气校正后的 OLI 图像中提取离水反射率。选取与实测光谱数据对应的 3×3 像元窗口; 统计 9 个像元反射率的平均值和标准差, 并剔除反射率值在均值 ± 1.5 倍标准差范围以外的像元; 计算剩余像元的反射率的平均值。

最后, 利用式 (12) 计算实测数据与 OLI 数据中 ρ_w 的平均相对误差:

$$e = \exp \left(\sum_{i=1}^{13} \left| \ln(x_i / y_i) \right| / 13 \right) - 1 \quad (12)$$

式中, e 为平均相对误差; x_i 和 y_i 分别为实测数据和 OLI 数据中的 ρ_w 值。

2.3 悬浮物浓度的反演

本文利用单波段算法来反演乌梁素海水体的悬浮物浓度 [27]:

$$SPM = \frac{A \rho_w^4}{1 - \rho_w^4 / C} \quad (13)$$

式中, SPM 为悬浮物浓度; ρ_w^4 为波段 4 的离水反射率; $A=289.29 \text{ g/m}^3$; $C=0.1686$ 。

3 结果与讨论

3.1 乌梁素海 OLI 数据的大气校正

3.1.1 气溶胶校正

气溶胶反射比 ε 的计算是 Vanhellemont 和 Ruddick 算法的关键步骤, 即选择特定波段。乌梁素海芦苇蔓延, 部分水域长有沉水植物, 而且近几年经常发生藻华现象, 水体的离水反射率很复杂。图 3 所示为乌梁素海开阔水体、沉水植物、黄苔藻华和芦苇的 ρ_c 光谱。可以看出, 由于植被在近红外波段的高反射现象, 沉水植物、黄苔藻华和芦苇在波段 5 的反射率与开阔水体的反射率之间具有很大差异, 说明乌梁素海水体的 $\varepsilon^{(5,6)}$ (或 $\varepsilon^{(5,7)}$) 值不是常数, 因此基于 $\varepsilon^{(5,6)}$ (或 $\varepsilon^{(5,7)}$) 的气溶胶校正不适合乌梁素海水体。芦苇在波段 6 或波段 7 的反射率与开阔水体、沉

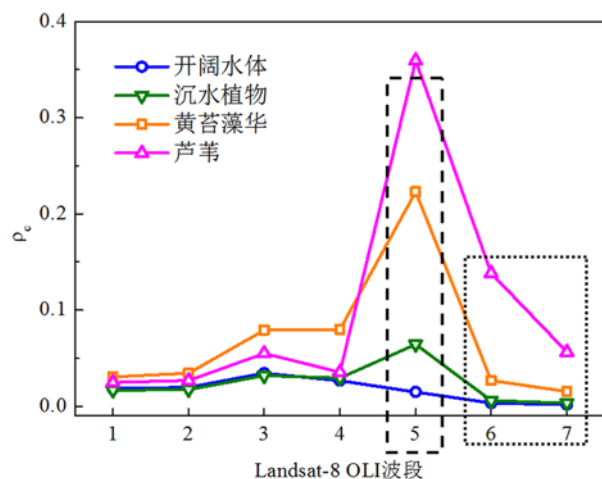


图 3 乌梁素海开阔水体、沉水植物、黄苔藻华和芦苇的反射率 ρ_c 对比

水植物和黄苔藻华的反射率之间具有较大差异,但乌梁素海的芦苇密度大(约 100 株/m²),可视为陆地植被,所以本文未考虑芦苇区的大气校正。开阔水体、沉水植物和黄苔藻华的反射率在波段 6 或波段 7 也存在一定的差异,然而其比值 $\varepsilon^{(6,7)}$ 约为常数。在波段 6 和波段 7,黄苔藻华和部分水域沉水植被的反射率 $\rho_a \neq \rho_c$ 。然而对于开阔水体, $\rho_a \approx \rho_c$ 的假设依然成立,因此选取 $S=6$ 和 $L=7$ 来计算气溶胶反射比 ε 。

本文对 Vanhellemont 和 Ruddick 算法的式(10)作了细微调整,即

$$\rho_w^i = \frac{1}{t^i} \left[\rho_c^i - (ow\varepsilon^{(6,7)})^{\delta_i} ow\rho_c^7 \right] \quad (14)$$

式中, $ow\varepsilon^{(6,7)}$ 为基于 OLI 波段 6 和波段 7 计算得到的开阔水体的 $\varepsilon^{(6,7)}$; $ow\rho_c^7$ 为开阔水体在波段 7 的 ρ_c 。首先,利用 $NDVI = (\rho_c^5 - \rho_c^4)/(\rho_c^5 + \rho_c^4) < 0$ 规则区分开阔水体与其他三类,然后统计开阔水体的 $\varepsilon^{(6,7)}$ 和 ρ_c ,并对其取中值作为式(14)的输入值。

3.1.2 算法适用性与误差源

为了检验大气校正算法的适用性,我们对由 Vanhellemont 和 Ruddick 算法获取的 OLI 反射率与由 ENVI Flaash 大气校正模块获取的 OLI 反射率进行了对比(见图 4)。可以看出,通过这两种方式得到的 OLI 反射率之间具有非常好的一致性($R^2=0.8$, 斜率为 $1.07 \approx 1.0$, 截距为 $-0.004 \approx 0$),

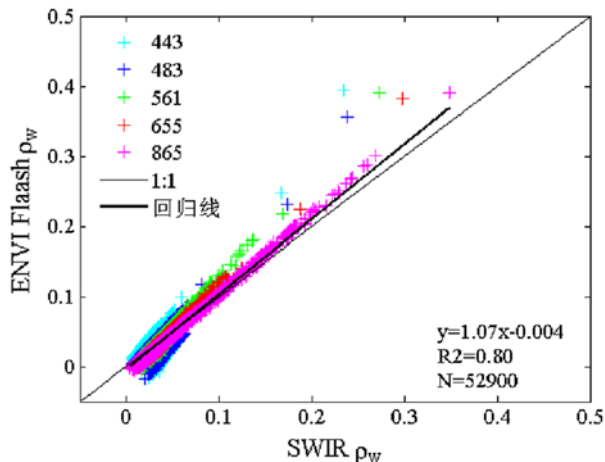


图 4 由 Vanhellemont 和 Ruddick 算法以及 ENVI Flaash 模块获取的 OLI 反射率对比

表明本文算法适用于乌梁素海 OLI 数据的大气校正。

此外,我们还对 2013 年 10 月 6 日和 10 月 22 日 OLI 数据中的 ρ_w 与 2013 年 10 月 16 日的实测离水反射率进行了对比(见图 5)。从整体上来看,大气校正后 OLI 数据中的反射率与实测值之间的一致性较好,但在个别波段仍存在较大差异。在 2013 年 10 月 6 日获得的数据中,波段 1~5 的平均相对误差分别为 65.1%、36.5%、19.3%、24.7% 和 188.6%;2013 年 10 月 22 日则为 50.3%、28.3%、23.9%、29.4% 和 79.4%。其中,443 nm 波段和 865 nm 波段的误差较大,其平均相对误差超过了 50%,2013 年 10 月 6 日 865 nm 波段的误差甚至达到了 188.6%;483 nm、561 nm

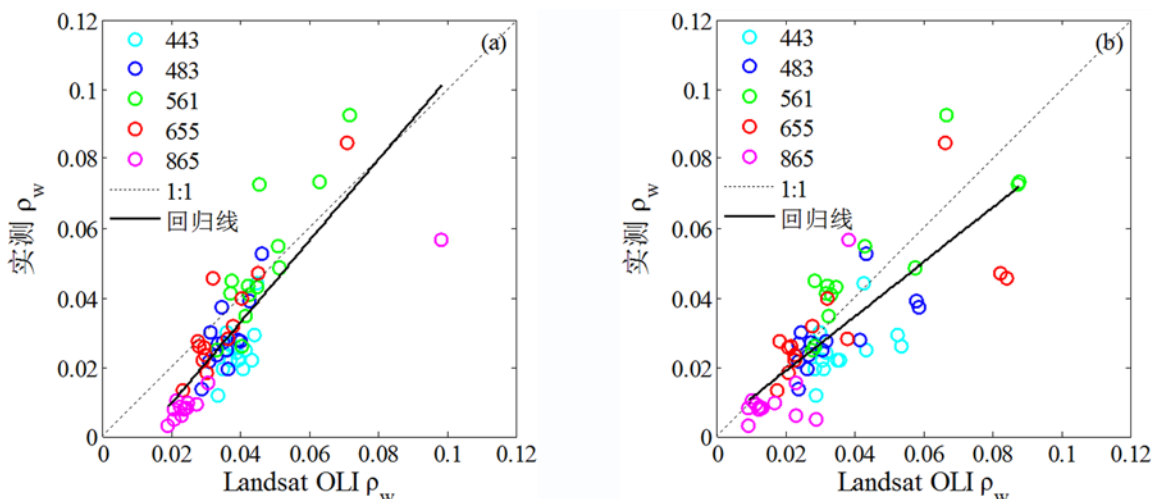


图 5 大气校正后的 OLI 反射率与实测值对比: (a) 2013 年 10 月 6 日; (b) 2013 年 10 月 22 日

和 655 nm 三个波段的大气校正结果较好,除了 2013 年 10 月 6 日的 483 nm 波段之外,其他波段的相对误差均优于 30%。结果表明,483 nm、561 nm 和 655 nm 三个波段的反射率变化波动不大,然而 443 nm 和 865 nm 波段的反射率则比较敏感。存在这些误差的主要原因是实测与卫星过境时间存在差异。在 2013 年 10 月 6 日、10 月 16 日和 10 月 22 日,研究区内的光照、气候等环境条件和人类活动痕迹必然不同,因而水体性质也会不同。这会直接影响表观光学性质,导致水体反射率的数值大小发生变化。然而,在 2013 年 10 月 6 日至 22 日的 16 天短周期内,水体反射率的光谱形状不会发生很大变化,说明由 Vanhellemont 和 Ruddick 算法获取的 OLI 离水反射率适用于对乌梁素海水体要素的时空分布趋势进行分析。

3.2 乌梁素海悬浮物浓度的遥感反演

3.2.1 悬浮物浓度算法的检验

由于乌梁素海研究区没有实测的悬浮物浓度数据,本文对比了基于 2013 年 10 月 16 日 13 个站位的实测遥感反射率数据和 2013 年 10 月 6 日、10 月 22 日大气校正后的 OLI ρ_w 数据计算得到的 SPM 结果,并定性地检验了 SPM 反演算

法。在站位 1、3 和 5 处计算得到的 SPM 浓度较高,分别为 18.97 g/m^3 、 18.04 g/m^3 和 49.2 g/m^3 。这与现场观测很吻合。在 2013 年 10 月 16 日的现场观测中,发现这三个站位的水体透明度很低。其原因是站位 1 和 3 位于西大滩,离灌区总排干很近,而站位 5 则位于出海码头附近,受陆源输入的影响大,因此水体非常浑浊。站位 4 的 SPM 浓度最低 (4.2 g/m^3),现场观测中发现此处水体清澈。站位 10 的水体也清澈,但其 SPM 浓度却达到了 15.0 g/m^3 ,因为水底长有沉水植物,水底植物的反射对离水反射率有一定的贡献,导致反演出的 SPM 浓度也高。其他站位的悬浮物浓度均未超过 15 g/m^3 。

图 6 和图 7 为 2013 年 10 月 6 日和 10 月 22 日乌梁素海特征较为明显的 4 个站位的 OLI ρ_w 真彩色合成图(波段 4、3 和 2 的合成图)。受灌区退水影响的站位 1、站位 4 的清澈水体、码头附近的高悬浮物带和站位 4 的水下植被均在 OLI ρ_w 真彩色合成图中清晰可见。另外,经反演得到的 SPM 浓度变化也能够反映在这些合成图中。例如,2013 年 10 月 6 日站位 1 处于悬浮物高浓度区与低浓度区的衔接处,而 2013 年 10 月

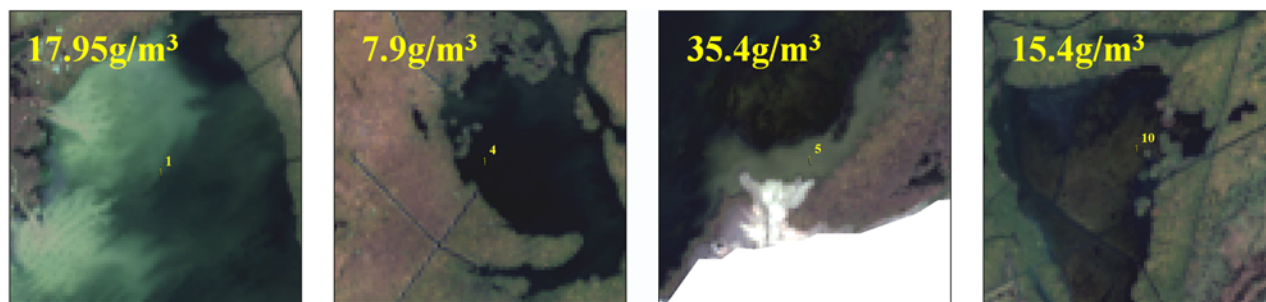


图 6 乌梁素海 2013 年 10 月 6 日的 OLI ρ_w 真彩色合成图

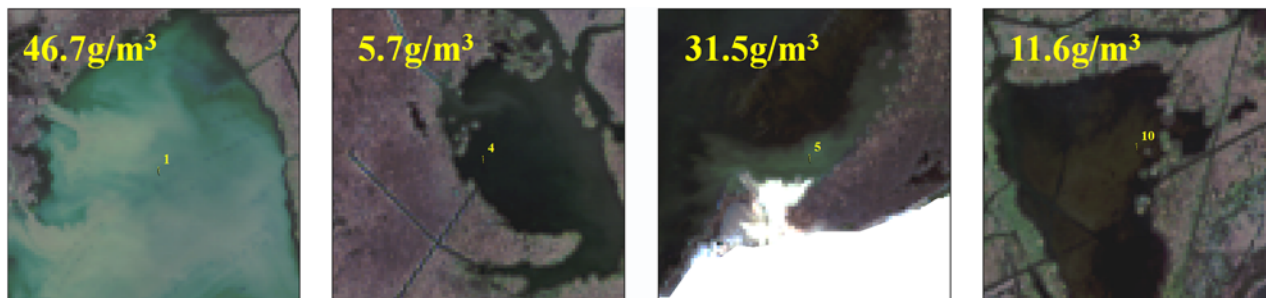


图 7 乌梁素海 2013 年 10 月 22 日的 OLI ρ_w 真彩色合成图

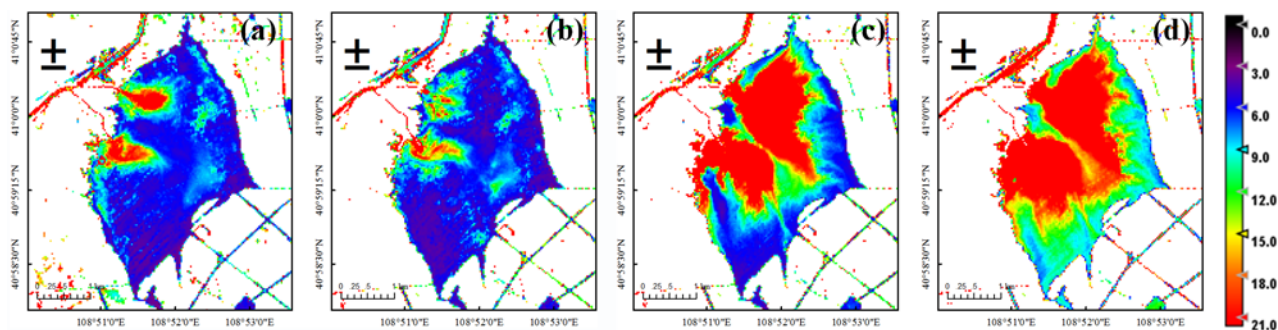


图 8 由 Landsat OLI 数据获取的乌梁素海样区 I 的悬浮物浓度分布图

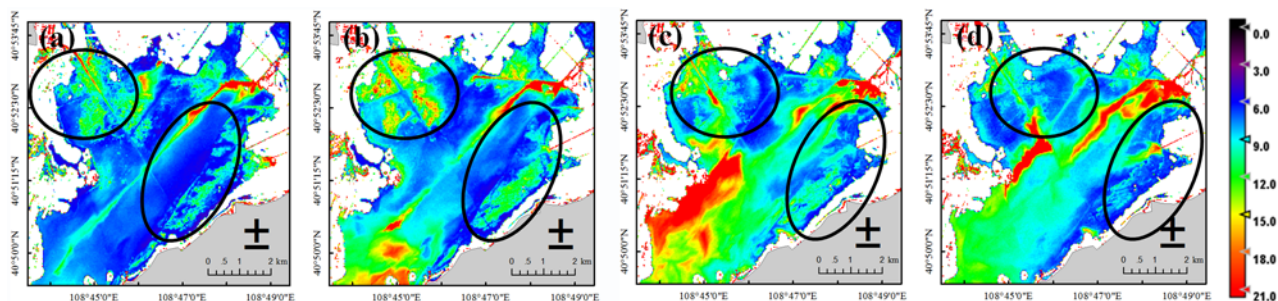


图 9 由 Landsat OLI 数据获取的乌梁素海样区 II 的悬浮物浓度分布图

22 日整个西大滩均为高浓度区。因此, 2013 年 10 月 6 日的 SPM 浓度 (17.95 g/m^3) 低于 10 日的 SPM 浓度值 (46.7 g/m^3)。结果表明, 该算法在乌梁素海水域具有一定的适用性。

3.2.2 悬浮物浓度的时空变化特性

由时间序列 OLI 数据 (2015 年 7 月至 10 月) 获取的悬浮物浓度图能够较好地刻画出样区 I 和样区 II 的悬浮物浓度的时空分布特征 (见图 8 和图 9)。受总排干两个排水渠的输入影响, 在样区 I 中, 两个悬浮物浓度锋清晰可见, 尤其在 10 月份的高浓度面积很大。7 月和 8 月的悬浮物浓度较低, 然而从 9 月底开始升高, 直至 10 月份达到最高峰。样区 II 的悬浮物浓度的时空分布十分复杂。此区域受灌区塔布渠和十排干的输入影响, 并且由于渔场很多, 人类活动频繁; 2015 年, 此样区东北部开始建设旅游码头, 所以图 9(a) 和图 9(b) 中明显出现了由码头工程引起的高悬浮物浓度带。值得注意的是, 图 9(c) 和图 9(d) 中黑色椭圆区域的悬浮物浓度也较高, 其原因是 2015 年 6 月至 8 月乌梁素海暴发黄苔藻华, 且椭圆区域为藻华高发区, 因此黄苔藻华的高反射率导致反演出的悬浮物浓度升高。然而 9

月和 10 月椭圆区域的悬浮物浓度依然较高, 其原因是虽然黄苔藻华消退, 但此区域长有大量水草; 水草的反射率会对离水反射率造成一定影响, 因此反演出的悬浮物浓度仍然较高。结果表明, 底质、沉水植物和黄苔藻华会直接影响悬浮物浓度的反演结果。若要精确反演悬浮物浓度, 则须对底质、沉水植物和藻华水体的反射率进行校正。

4 结束语

基于 Vanhellemont 和 Ruddick 算法, 利用短波红外波段对乌梁素海水体的 Landsat-8 OLI 数据进行了大气校正。利用由 ENVI Flaash 模块得到的结果检验了 OLI 数据的大气校正结果。经检验发现, 用以上两种方式得到的离水反射率之间具有很好的一致性 (R^2 为 0.8, 斜率约为 1.0, 截距约为 0)。利用 2013 年 10 月 16 日的光谱数据检验了 2013 年 10 月 6 日和 10 月 22 日两景 OLI 数据的大气校正结果, 发现 OLI 数据在 443 nm 和 865 nm 波段存在较大误差, 其平均相对误差超过 50%; 在 483 nm、561 nm 和 655 nm 波段, 大气校正的平均相对误差在 19.3% ~ 36.5% 之间;

这些波段在大气校正之后的离水反射率与实测数据吻合得较好。误差原因主要是实测时间与卫星过境时间的不匹配。用基于红光波段 (OLI 数据中的 655 nm 波段) 的算法反演了乌梁素海的悬浮物浓度。基于真彩色合成图的定性检验结果表明, 该算法在乌梁素海水域具有一定的适用性。本文利用时间序列 OLI 数据分析了乌梁素海悬浮物浓度的时空分布特征。受灌区农田退水和人类活动的影响, 乌梁素海悬浮物浓度的时空分布特征十分复杂。然而, 悬浮物浓度的反演具有一定的不确定性, 其主要原因是浅水底质、沉水植物和藻华水体的反射率会影响离水反射率。因此, 若要精确反演悬浮物浓度, 则需消除这些因素的影响。结果表明, 基于短波红外波段的 Vanhellemont 和 Ruddick 算法在乌梁素海具有一定的适用性。

参考文献

- [1] Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, et al. MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **65**(3): 367–375.
- [2] Vermodte E F, Tanre D. 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.
- [3] Hu Y, Liu L Y, Liu L L, et al. A Landsat-5 Atmospheric Correction Based on MODIS Atmosphere Products and 6S Model [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, **7**(5): 1609–1615.
- [4] Roy D P, Qina Y, Kovalskyy V, et al. Conterminous United States Demonstration and Characterization of MODIS-based Landsat ETM+ Atmospheric Correction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**: 433–449.
- [5] 周莉, 李云梅, 郭宇龙, 等. 基于辐射传输优化模型的二类水体大气校正 [J]. *光学学报*, 2014, **34**(2): 7–15.
- [6] Bonansea M, Ledesma C, Rodriguez C, et al. Effects of Atmospheric Correction of Landsat Imagery on Lake Water Clarity Assessment [J]. *Advances in Space Research*, 2015, **56**(11): 2345–2355.
- [7] Gordon H R, Wang M H. Retrieval of Water-leaving Radiance and Aerosol Optical Thickness over the Oceans with SeaWiFS: A Preliminary Algorithm [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(3): 443–452.
- [8] Gordon H R. Atmospheric Correction of Ocean Color Imagery in the Earth Observing System Era [J]. *Journal Geophysical Research*, 1997, **102**(17): 81–106.
- [9] Wang M H, Shi W. The NIR-SWIR Combined Atmospheric Correction Approach for MODIS Ocean Color Data Processing [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(24): 15722–15733.
- [10] Wang M H, Son S H, Shi W. Evaluation of MODIS SWIR and NIR-SWIR Atmospheric Correction Algorithms Using SeaDASS Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(3): 635–644.
- [11] Chen S G, Zhang T L, Hu L B. Evaluation of the NIR-SWIR Atmospheric Correction Algorithm for MODIS-Aqua over the Eastern China Seas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, **35**(11–12): 4239–4251.
- [12] He Q J, Chen C Q. A New Approach for Atmospheric Correction of MODIS Imagery in Turbid Coastal Waters: A Case Study for the Pearl River Estuary [J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, **5**(3): 249–257.
- [13] Wang M H, Son S H, Zhang Y L, et al. Remote Sensing of Water Optical Property for China's Inland Lake Taihu Using the SWIR Atmospheric Correction With 1640 and 2130 nm Bands [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, **6**(6): 2505–2516.
- [14] Chen J, Cui T W, Lin C S. An Improved SWIR Atmospheric Correction Model: A Cross-Calibration-Based Model [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(7): 3959–3967.
- [15] Zhang M W, Ma R H, Li J S, et al. A Validation Study of an Improved SWIR Iterative Atmospheric Correction Algorithm for MODIS-Aqua Measurements in Lake Taihu, China [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(8): 4686–4695.
- [16] He X Q, Pan D L, Mao Z H. Atmospheric Correction of SeaWiFS Imagery for Turbid Coastal and Inland Waters [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, **23**(4): 609–615.

- [17] Roy D P, Wulderb M A, Loveland T R, et al. Landsat-8: Science and Product Vision for Terrestrial Global Change Research [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **145**: 154–172.
- [18] Ding H M, Shi J S, Wang Y F, et al. An Improved Dark-object Subtraction Technique for Atmospheric Correction of Landsat 8 [C]. *SPIE*, 2015, **9815**: 98150K.
- [19] Concha J A, Schott J R. A Model-based ELM for Atmospheric Correction over Case 2 Water with Landsat 8 [C]. *SPIE*, 2014, **9111**: 911112.
- [20] Vanhellemont Q, Ruddick K. Turbid Wakes Associated with Offshore Wind Turbines Observed with Landsat 8 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **145**: 105–115.
- [21] 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.
- [22] Concha J A, Schott J R. Atmospheric Correction for Landsat 8 over Case 2 Waters [C]. *SPIE*, 2015, **9607**: 96070R.
- [23] Concha J A. Landsat-8's Atmospheric Correction in SeaDAS: Comparison with AERONET-OC [C]. *SPIE*, 2016, **9972**: 997212.
- [24] Wang Y J, Liu L Y, Hu Y, et al. Development and Calibration of the Landsat-8 Surface Reflectance Products Using a MODIS-based Per-pixel Atmospheric Correction Method [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, **37**(6): 1291–1314.
- [25] Peng Y, He G J, Zhang Z M, et al. Study on Atmospheric Correction Approach of Landsat-8 Imageries Based on 6S Model and Look-up Table [J]. *J Appl Remote Sens*, **10**(4): 045006.
- [26] 于瑞宏, 李畅游, 刘廷玺, 等. 乌梁素海湿地环境的演变 [J]. *地理学报*, 2004, **59**(6): 948–955.
- [27] Nechad B, Ruddick K, Park Y. Calibration and Validation of a Generic Multisensor Algorithm for Mapping of Total Suspended Matter in Turbid Waters [J]. *Remote Sensing of Environment* 2010, **114**: 854–866.

(上接第 20 页)

参考文献

- [7] Kwee P, Willke B, Danzmann K. Shot-noise-limited Laser Power Stabilization with a High-power Photodiode Array [J]. *Opt Lett*, 2006, **34**(19): 2912–2914.
- [8] Alouini M, Benazet B, Vallet M. Offset Phase Locking of Er,Yb:glass Laser Eigenstates for RF Photonics Applications [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, **13**(4): 367–369.
- [9] Valling S, Stahlberg B, Lindbergn A M. Tunable Feedback Loop for Suppression of Relaxation Oscillations in a Diode-pumped Nd:YVO₄ Laser [J]. *Opt Laser Technol*, 2007, **39**(1): 82–85.
- [10] Shevy Y, Shevy D, Lee R, et al. Slow Light Laser Oscillator [C]. San Diego: Optical Fiber Communication Conference, 2010.
- [11] Leeuwen R V, Xu B, Watkins L S, et al. Low Noise High Power Ultra-stable Diode Pumped Er-Yb Phosphate Glass Laser [C]. *SPIE*, 2008, **6975**: 69750K.
- [12] Pan Z Q, Zhou J, Yang F, et al. Low-frequency Noise Suppression of a Fiber Laser Based on a Round-trip EDFA Power Stabilizer [J]. *Laser Phys*, 2013, **23**(3): 035105.
- [13] Feng Z M, Li C, Xu S H, et al. Significant Intensity Noise Suppression of Single-frequency Fiber Laser via Cascading Semiconductor Optical Amplifier [J]. *Laser Phys Lett*, 2015, **12**(9): 095101.
- [14] Li C, Xu S H, Huang X, et al. All-optical Frequency and Intensity Noise Suppression of Single-frequency Fiber Laser [J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(9): 1964–1967.
- [15] Danion G, Bondu F, Loas G, et al. GHz Bandwidth Noise Eater Hybrid Optical Amplifier: Design Guidelines [J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(14): 4239–4242.
- [16] Yamada M, Takeuchi N, Sakumoto K, et al. Variation of Relative Intensity Noise with Optical Power in InGaAsP Semiconductor Optical Amplifier [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, **24**(22): 2049–2051.
- [17] Xu D, Yang F, Chen D J, et al. Laser Phase and Frequency Noise Measurement by Michelson Interferometer Composed of a 3*3 Optical Fiber Coupler [J]. *Opt Express*, 2015, **23**(17): 22386–22393.