

Landsat-8 OLI 卫星数据的大气校正检验及其应用

阿如汗¹, 青松¹, 包玉海^{1,2}

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 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, 呼和浩特 010022)

摘要: 本文检验了 Vanhellemont 和 Ruddick 算法在浑浊的海洋沿岸水体中的适用性。采用基于 Vanhellemont 和 Ruddick 算法对 2013—2015 年黄河口水体的 landsat-8 OLI 数据进行大气校正, 该算法得到的 OLI 反射率与黄河口高光谱实测反射率较一致, R 为 0.95, 在 483 nm(蓝)、561 nm(绿)、655 nm(红) 波段处平均相对误差为 16.4%、17.3%和 25.7%。MODIS 和 Landsat-8 OLI 数据获取的悬浮物浓度之间一致性较好, R 为 0.85, 平均相对误差为 20.5%, 表明该算法适用于黄河口水体。基于时间序列 OLI 数据, 得到了悬浮物浓度时空分布特征。黄河口悬浮物浓度变化差异主要由风速和输沙量引起的, 风速和输沙量对悬浮物浓度的影响存在一定的时间滞后现象。

关键词: 大气校正; Landsat-8 OLI; 算法校验; 黄河口

中图分类号: TP7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2018)06-0107-09

DOI: 10.11759/hyqx20171101001

海洋水色卫星传感器接收的总信号中大约 85% 以上的信号来自瑞利散射和气溶胶散射, 而包含水体信息的离水辐射信号不足 15%, 即使是很小的大气校正误差也能引起很大的水质参数反演误差, 导致大多数光学遥感图像的可利用性低。因此, 消弱这些因素的影响, 即对获得的影像进行大气校正显得尤为重要。如何将水体信息同大气信息分离, 是水色遥感得以应用的关键^[1-4]。

大气校正是要从混浊水域中把气溶胶和海洋贡献分离。在国内外的水色遥感研究, 前人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^[5-7]算法。然而此类方法需要实时的大气参数数据。因此, 基于遥感影像特定波段的算法得到很好的发展。针对这一类水体 Gordon 等^[8]把两个或两个以上的近红外波段的离水辐亮度假定为零, 提出海洋大气校正算法。对清澈水近红外反射率零是有效的^[9]。然而浑浊水体近红外波段的反射率并不为零, 高浊度海洋辐亮度在近红外波段不是线性关系^[10-11], 需要准确的近红外波段的光谱之间关系来建模^[12-13]。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。在 GOCI 领域内 Wang 等^[14]已开发高混浊水的模型。海洋水色传感器的短波红

外波段和现有的短波段有显著的噪音^[15-17]。在 SeaDAS 水域处理中非零的近红外反射率模型已用在低到中度混浊水域^[18-19]。

目前 Vanhellemont 和 Ruddick^[20, 21]针对 Landsat-8 OLI 发展了基于短波红外波段的一种大气校正算法, 并用中分辨率成像光谱仪(MODIS)进行了检验, 已经在比利时的沿岸浑浊水体和泰晤士河口水体中得到了验证。青松等^[22]已验证基于 Landsat8 OLI 短波红外的 Vanhellemont 和 Ruddick 的算法在乌梁素海的适用性。

黄河口位于渤海的西部, 受黄河大量泥沙注入影响, 其光学性质非常复杂, 水体也极度浑浊。因此本文基于 Vanhellemont 和 Ruddick 的算法, 进行黄河口 Landsat-8 OLI 数据的大气校正, 进而检验该算法在浑浊的海洋沿岸水体中的适用性。在此基础上, 利用时间序列 OLI 数据反演黄河口水体的悬浮物浓度, 并结合输沙量数据和海面风场数据分析其时空分布特征和影响因素。

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2018-01-10

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

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.61265008; Inner Mongolia Natural Science Foundation, No.2012MS0608]

作者简介: 阿如汗(1993-), 女, 内蒙古兴安人, 蒙古族, 硕士研究生, 研究方向为 GIS&RS 应用, 电话: 18247159148, E-mail: 742361852@qq.com; 青松, 通信作者, 副教授, 主要从事遥感教学和研究, 电话: 18347160950, E-mail: chrisqs27@126.com

1 研究数据

1.1 研究区

黄河是我国最有代表性的入海河流之一，并且

黄河是世界上泥沙含量最高的河^[23]。本文共获取黄河河口海域 16 个站点的光谱数据，采样时间为 2015 年 6 月 3—11 日，并将其作为研究区大气校正结果的检验数据，站位分布见图 1。

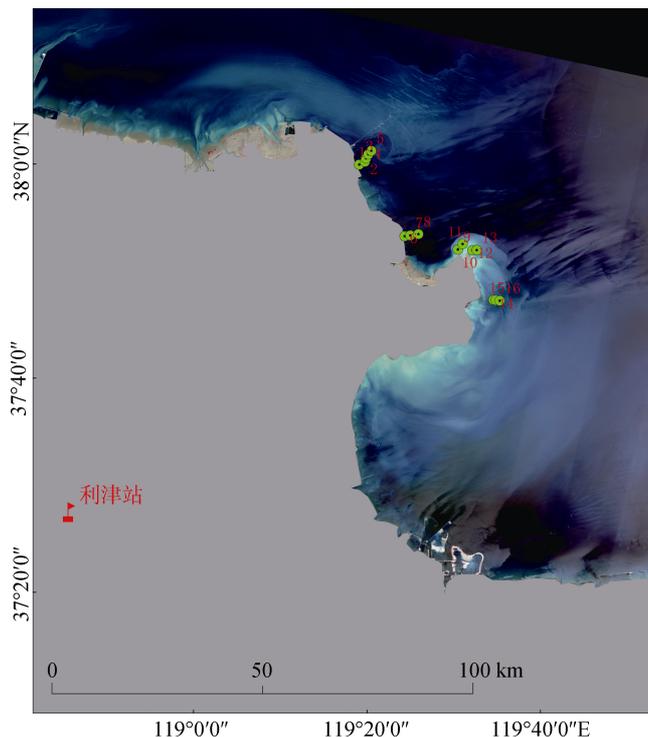


图 1 黄河口区域实测数据站位图

Fig. 1 Location of situ data in the Yellow River estuary

1.2 实测数据

利用 ASD (Analytical Spectral Devices) 公司生产的便携式双通道可见光—近红外光谱辐射计 Field SpecPro Dual VNIR 获取水面遥感反射率。ASD 光谱仪波长覆盖范围为 350~1 050 nm，采样间隔为 1.4 nm，记录数据间隔为 1 nm，光谱分辨率为 3 nm，波长精度为 ±1 nm。它配有两个 512 通道的分光计，可同时测量目标物体和参考物体的光谱。

遥感反射率光谱如图 2 所示。可以看出光谱曲线形状很相似，当悬浮物浓度处于不同区间时，水体光谱具有明显的差异性。现场观测光谱中发现这 16 个站点光谱曲线已经分成明显的两部分，上半段五个曲线为黄河口处的 9、10、11、12 和 13 号站点，这五个曲线反射率明显高于其他点，其在黄河口输沙口，还有 750~900 nm 期间这两组曲线区别明显，可能是因为下半部分对应的区域水域较混浊。

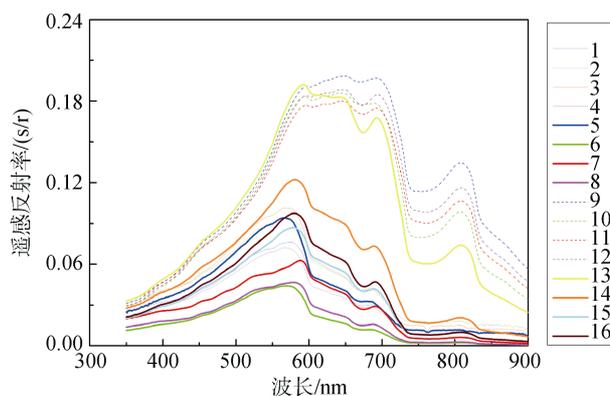


图 2 黄河口实测遥感反射率光谱曲线

Fig. 2 The spectral curve of the remote sensing reflectivity of the huanghe estuary

从网上下载得到 2013—2015 年的黄河利津水文站的月输沙量(黄河泥沙公报网 <http://www.yellowriver.gov.cn/nishagonggao/>)和 2013~2015 年 CCMP 卫星遥感海面风场数据(<https://www.remss.com/measurements/ccmp>)，分析黄河口海域悬浮物浓度分布特征。该海面

风场数据空间分辨率为 0.25°, 时间间隔为 6 h, 给出的是距海面 10 m 处风场沿经向和纬向的速度分量。

1.3 遥感数据

本文所用的遥感数据为黄河口海域 2013—2015 年 7 景(121/34)Landsat-8 OLI 影像, (<https://glovis.usgs.gov/>), OLI 数据波段设置见表 1。本文还下载了 2013—2015 年 7 景对应的中分辨率成像光谱仪(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)MODIS 数据, 用于大气校正结果的检验。

表 1 Landsat-8 OLI 数据波段信息
Tab. 1 bands of Landsat-8 OLI data

波段	中心波长/ μm	空间分辨率/m
1	0.443	30
2	0.483	30
3	0.561	30
4	0.655	30
5	0.865	30
6	1.609	30
7	2.201	30
8	0.592	15
9	1.373	30

2 方法

本文利用 Vanhellemont 和 Ruddick^[20-21]的方法, 首先利用 Landsat-8 OLI 数据对其进行辐射定标、瑞利校正和气溶胶校正即完成大气校正, 获得 Landsat-8 OLI 数据遥感反射率, 并对 MODIS 数据采用同样的方法获得 MODIS 数据的遥感反射率, 地面实地调查获得实测水体光谱数据, 采用地面实测数据和 MODIS 数据来验证大气校正结果, 最后反演与分析黄河口悬浮物浓度空间分布特征, 并采用输沙量数据和海面风场数据分析悬浮物浓度的影响。

2.1 大气校正

本文参考 Vanhellemont 和 Ruddick 的方法基于黄河口区域 Landsat-8 OLI、MODIS 影像进行大气校正。主要方法如下所述。

2.1.1 大气层顶反射率

首先, 利用如下公式计算遥感影像的辐射亮度值:

$$L_{\text{TOA}} = aD_N + b \quad (1)$$

式中, L_{TOA} 为大气顶层辐射亮度, D_N 为图像灰度值, a 和 b 分别为定标参数, 由 OLI 数据的头文件中获取。

其次, 基于公式(2)将辐射亮度转换为大气层顶的反射率:

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

式中, d 是日地距离天文单位, F_0 为波段平均太阳辐射, θ_0 为太阳高度角。

2.1.2 瑞利校正

水体的大气顶层反射率可以表示为瑞利反射率、气溶胶反射率和离水反射率之和。

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

式中, ρ_γ 是瑞利反射率, ρ_a 是气溶胶反射率, ρ_w 是离水反射率, t 为大气透射率。

利用如公式(4)计算瑞利反射率:

$$\rho_\gamma = \frac{T_\gamma P_\gamma(\theta_0, \theta_v, \Delta\varphi)}{4\cos\theta_0\cos\theta_v} \quad (4)$$

式中, T_γ 是瑞利光学厚度, P_γ 是瑞利散射相位函数, θ_0 和 θ_v 分别是太阳和卫星的天顶角, $\Delta\varphi$ 是太阳和卫星的相对方位角。

其次, 基于公式(5)计算瑞利校正后的反射率:

$$\rho_c = \rho_{\text{TOA}} - \rho_\gamma \quad (5)$$

2.1.3 气溶胶校正

Vanhellemont 和 Ruddick 的算法的核心是气溶胶校正。此算法有两个假设: (1)近红外波段的 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:

$$\varepsilon^{(S,L)} = \frac{\rho_a^{(S)}}{\rho_a^{(L)}} = \frac{\rho_c^{(S)}}{\rho_c^{(L)}} \quad (6)$$

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

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

$$\varepsilon^{(S,L)} = \left(\varepsilon^{(S,L)}\right)^{\sigma_i} \quad (7)$$

式中, $\sigma_i = \frac{L - \lambda_i}{L - S}$ 。

然后第 i 波段的气溶胶反射率可由式(8)计算得到:

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

将公式(7)和公式(8)代入公式(5)中, 可以得到 OLI 数据各波段的离水反射率:

$$\rho_w^i = \frac{1}{t^i} \left[\rho_c^i - \left(\varepsilon^{(S,L)}\right)^{\sigma_i} \rho_a^L \right] \quad (9)$$

2.2 悬浮物浓度反演

本文利用单波段算法来反演黄河口水体的悬浮

物浓度, Nechad 等^[24]提出一种基于多传感器数据的浑浊水体悬浮物浓度反演算法, 结合光谱反射率模型, 以实测的欧洲南北海海区水体遥感反射率与悬浮物浓度数据为基础, 拟合得到了适用于 SeaWiFS、MODIS、MERIS 等多水色卫星传感器的单波段悬浮颗粒物浓度半分析反演算法, 并在欧洲北海海区得到良好的真实性检验效果。基于此算法 Vanhellemont 和 Ruddick 等^[20-21]已发展出基于 Landsat OLI、MODIS 数据的单波段反演算法。

$$C_{SPM} = \frac{A\rho_w}{1-\rho_w/C} \quad (10)$$

式中, C_{SPM} 为悬浮物(Suspended particulate matter, SPM)浓度, ρ_w 为离水反射率。针对 Landsat-8 OLI 的 655 nm 波长使用, $A=289.29 \text{ g/m}^3$, $C=0.1686$, 对于 MODIS/Aqua 的 645 nm 使用, $A=258.85 \text{ g/m}^3$ 且 $C=0.1641$ 。

2.3 精度检验

基于 MODIS 得到的 SPM 结果检验了 Landsat OLI 反演结果, 精度检验使用平均相对误差公式:

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \times 100\% \quad (11)$$

式中, x_i 为 Landsat OLI 数据 SPM, y_i 为 MODIS 数据 SPM, N 为样本数。

3 结果与讨论

3.1 大气校正算法验证

为了检验大气校正算法的适用性, 对由 Vanhellemont 和 Ruddick 算法获取的 OLI 反射率(5 日成像)与实测离水反射率(4、5、8、9 日获取)进行对比(见图 3), 发现大气校正后 OLI 数据中的反射率与实测值之间较一致, R 为 0.95, 在 483 nm(蓝)、561 nm(绿)、

655 nm(红)波段处平均相对误差分别为 16.4%、17.3%和 25.7%。误差存在的主要原因是实测时间与卫星过境时间存在差异, 水体性质也不同, 将会直接影响表现光学性质, 导致水体反射率的数值发生变化, 但水体反射率的光谱形状不会发生很大变化, 说明本文所用的 Vanhellemont 和 Ruddick 的方法适用于对黄河口 OLI 数据大气校正。

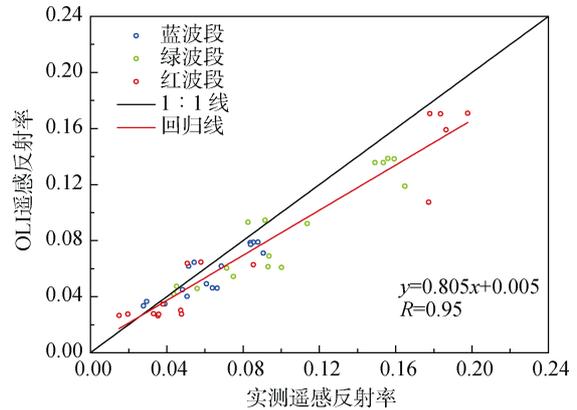


图 3 实测数据与 Landsat-8 OLI 数据遥感反射率对比图
Fig. 3 Comparison of measured data and OLI data in remote sensing reflectance

此外, 对由 Vanhellemont 和 Ruddick 算法获取的 OLI 数据蓝、绿、红波段反射率与 MODIS 数据蓝、绿、红波段反射率进行对比(见图 4), 发现大气校正后 OLI 数据中的反射率与 MODIS 数据反射率之间的一致性较好, R 分别为 0.89、0.91、0.90, 在蓝、绿、红波段处平均相对误差为 26.8%、17.8%和 18.7%。

对基于 OLI 数据和 MODIS 数据计算得到的 SPM 结果进行对比(见图 5), 发现 OLI 数据 SPM 与 MODIS 数据 SPM 之间的一致性较好, R 为 0.85, 平均相对误差为 20.5%。

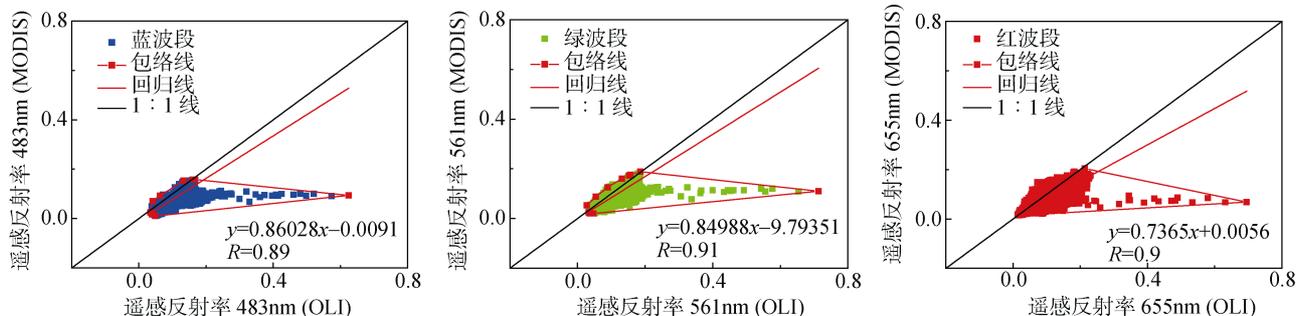


图 4 MODIS 遥感反射率和 Landsat-8 OLI 遥感反射率蓝、绿、红波段反射率对比图

Fig. 4 Contrast maps of remote sensing reflectance between MODIS and Landsat-8 OLI in blue, green and red spectral reflectance band blue green red

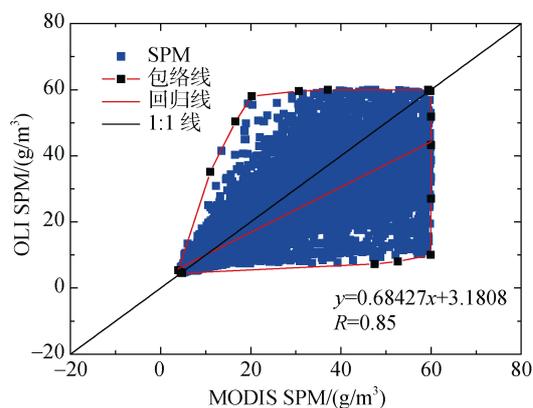


图5 MODIS 和 OLI SPM 对比图

Fig. 5 Contrast maps of MODIS and OLI SPM

MODIS 反射率和 SPM 存在误差的主要原因是研究区的时间动态观察条件和传感器设计的差异,对 MODIS 来说由于观测天顶角较大,导致图像中的

几何变形也很大,以至于造成与 Landsat-8 OLI 数据不匹配。这空间错配引入了相当大的错误,尤其是分辨率不同的传感器(OLI: 30 m, MODIS: 250 m)。此外,由于 MODIS 的扫描系统在扫描线之间有显著的重叠和他们之间也存在时间差,可以造成表面 SPM 浓度的显著差异。Landsat-8 OLI 和其他高分辨率的传感器可以被用来监测海上风力发电机组引起的混浊。悬浮物浓度的定量监测,红色和近红外波段的气溶胶校正需要信噪比足够高的传感器。说明本文所用的 Vanhellemont 和 Ruddick 的方法适用于对黄河口水体 OLI 悬浮物浓度反演。

3.2 悬浮物浓度反演

将 SPM 模型(公式(10))应用于 2013—2015 年黄河口水体校正结果图,获取了悬浮物浓度时空分布图,结果如图 6 所示。大致反映了春夏秋冬黄河口附近

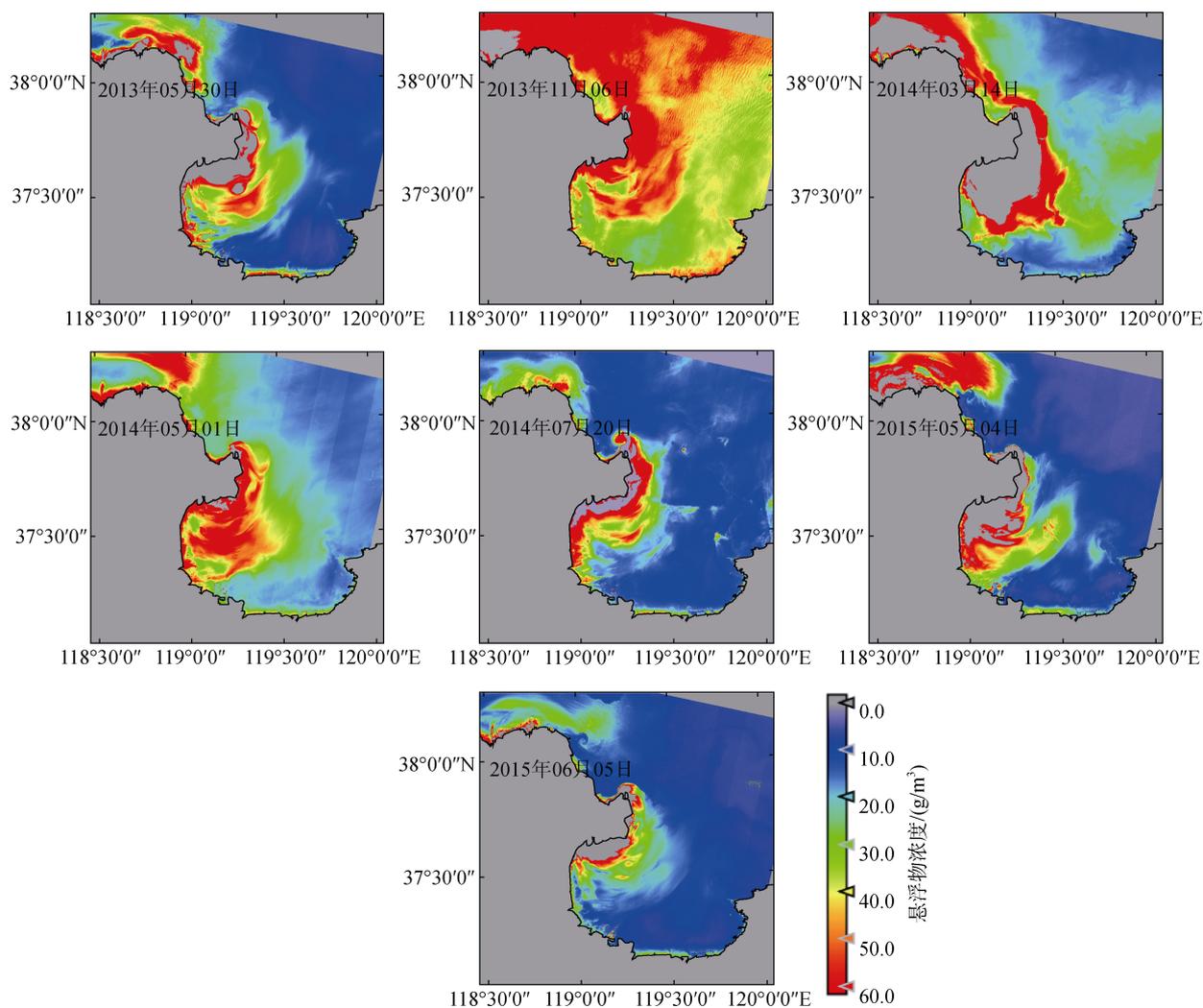


图6 黄河口附近 SPM 年际变化

Fig. 6 Huanghe estuary variation of near SPM

SPM 分布变化的规律, 整个黄河口附近的海面, SPM 小于 60.0 g/m^3 : 冬季>夏季, 夏季 SPM 最低, 这与许多学者^[25-27]研究东海陆架泥质区悬浮体含量有季节性变化(冬季悬浮体含量远高于其他季节, 夏季悬浮体含量低)的结论基本一致。

黄河口附近 SPM 年际变化发现不同年份中同一月份 SPM 分布情况总体趋同, 分布情况: 5 月、7 月 SPM 值较低; 11 月 SPM 值较大。黄河口表层悬浮物浓度的季节性差异显著, 风场等气候因素应是该季节性差异的主要原因^[28-29]。在黄河口附近选定 A、B、

C 三个区域, 分别统计其 SPM 均值, A、B 区 SPM 值相对于 C 区大些, 在 3 个区域中位于 B 区悬浮物浓度为相对较高, 可以看出黄河每年携带大量泥沙入海对渤海悬浮物浓度 B 区的贡献很大, 可能是 A 区域与 B 区域离黄河口比较相近, C 区域离黄河口较远, 也有可能离悬沙物源较远、以及水深有关, 这与吴昊^[30]等的黄、渤海悬浮物浓度近岸浓度高, 远岸浓度低结果一致。文本用 2013—2015 年输沙量数据和海面风场数据分析对 B 区域悬浮物浓度的影响(如图 7 所示)。

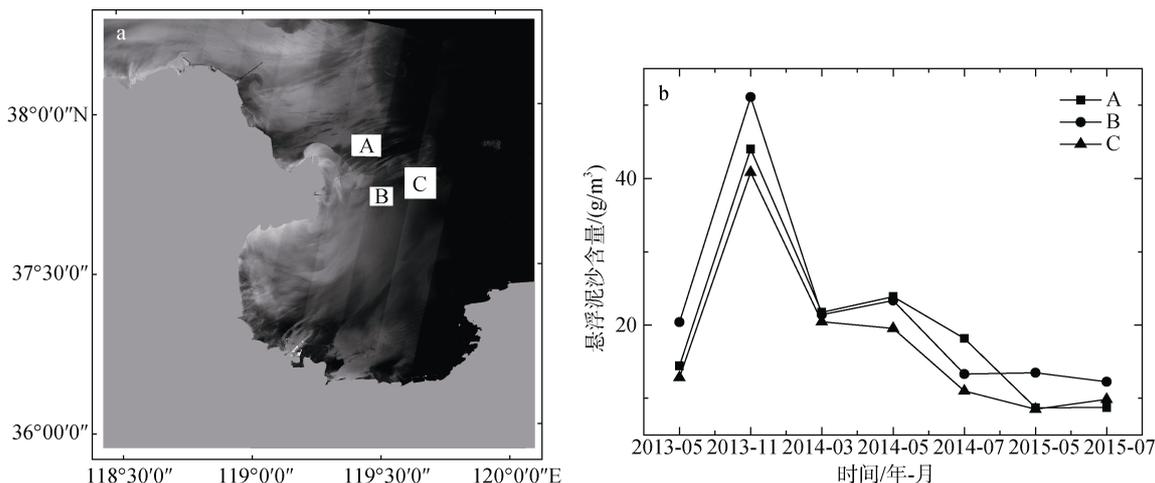


图 7 SPM 感兴区位置图(a)和感兴区悬浮泥沙含量随时间变化图(b)
Fig. 7 The location of SPM ROI(a) and SPM changes over time(b)

黄河口悬浮物浓度变化差异主要由风速和输沙量引起的。本文利用 6 h 时间分辨率 CCMP 海面风场数据和黄河利津水文站的月输沙量数据进行分析。图 8a 为 2013—2015 年悬浮物浓度与当月至前 3 月输沙量间的相关系数图, 图 8b 为 2013—2015 年悬浮物浓度与当日至前 30 d 风速间的相关系数图。通过分析数据所对应时间上的输沙量和风速变化与悬浮物浓度的关系, 能更好地揭示水域不同时期与哪个要素的关系更为密切。从输沙量与悬浮物浓度关系来看(图 8a), 与前 3 月输沙量相关系数更显著, 其他月份悬浮物浓度与输沙量变化的相关性较小, 从图 8c 中可知, 与前 1 月的输沙量间相关系数为 -0.42 。从风速与悬浮物浓度关系来看(图 8b), 与前 30 d 和 26 d 风速相关系数更大, 从图 8d 中可知, 与前 30 d 相关系数为 0.59 。对照当月、前 1 月、前 2 月和前 3 月输沙量变化与悬浮物浓度变化的关系, 来揭示输沙量对悬浮物韵律的控制。从变化关系来看(图 9a), 悬浮物浓度与前 1 月输沙量变化基本一致, 说明悬

浮物浓度对前 1 月输沙量存在滞后性。从与风速变化关系来看(图 8b), 与前 30 d 风速的相关性明显高于与当日风速变化的相关性, 悬浮物浓度与前 30 d 风速变化基本一致, 说明悬浮物浓度对风速变化具有明显的滞后性(如图 9b), 这与已有学者研究结果一致^[29]。悬浮物浓度与风速和输沙量的滞后性基本一致。这跟崔廷伟等^[28]的研究, 风速具有滞后性, 大风过程可以显著改变全渤海的悬浮泥沙空间分布格局吻合。

4 结束语

本文基于 Vanhellemont 和 Ruddick 的算法, 对 2013—2015 年黄河口 Landsat-8 OLI 数据进行大气校正, 利用 2015 年 6 月黄河口高光谱实测反射率数据检验了 OLI 数据的大气校正结果, 经检验发现, 两种反射率之间较一致, 相关系数为 0.95 , 在蓝、绿、红波段处平均相对误差分别为 16.4% 、 17.3% 和 25.7% 。误差的主要原因是实测时间与卫星过境时间

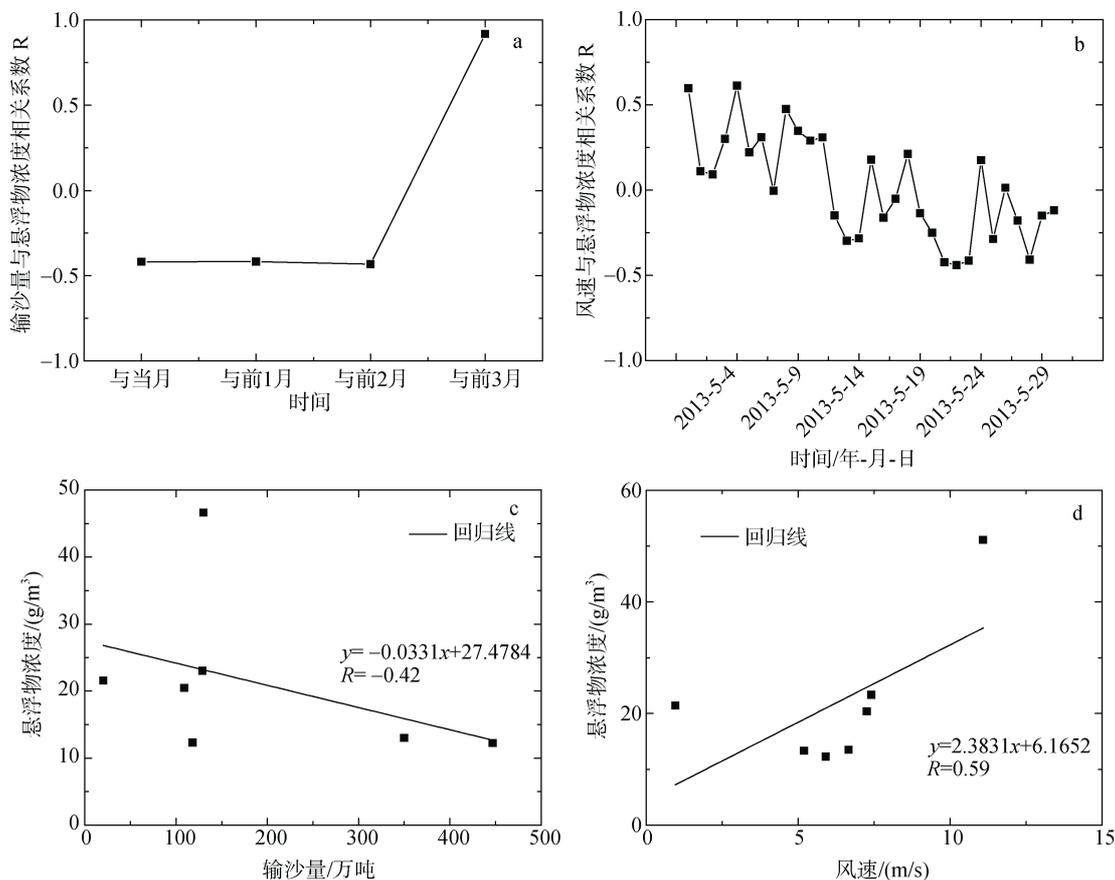


图 8 2013~2015 年悬浮物浓度与输沙量(a、c)、风速(b、d)的相关系数图

Fig. 8 The correlation coefficient of suspension particulate matter and sediment load(a、c)、 wind speed (b、d) from 2013 to 2015

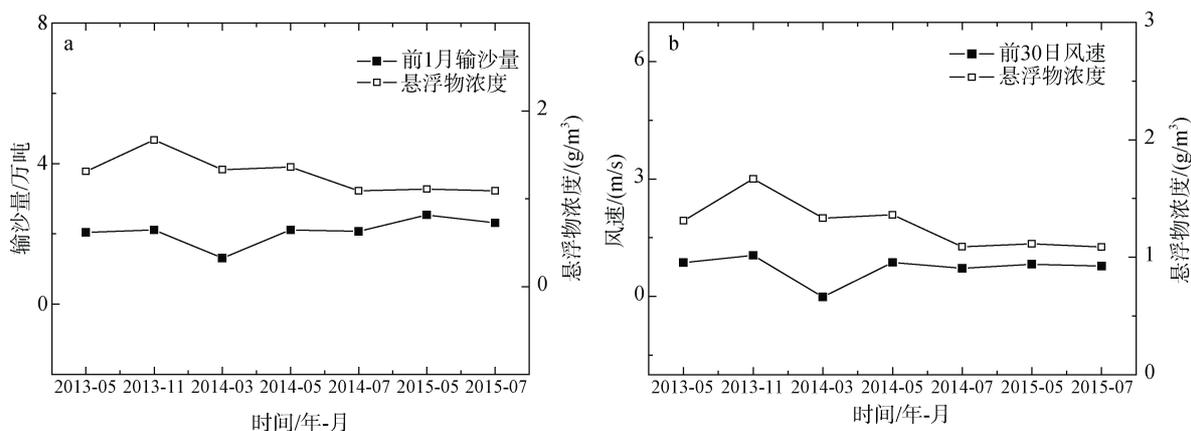


图 9 2013—2015 年输沙量(a)、风速(b)和悬浮泥物浓度随时间变化图

Fig.9 The sediment(a)、 wind speed(b) and SPM changes over time from 2013 to 2015

不匹配。利用 MODIS 数据检验了 OLI 数据大气校正结果。发现 Landsat-8 OLI 数据蓝、绿、红波段与 MODIS 数据蓝、绿、红波段的相关系数分别为 0.89、0.91、0.90, 在蓝、绿、红波段处平均相对误差为 26.8%、17.8%和 18.7%。OLI 数据和 MODIS 数据计

算得到的 SPM 结果进行对比发现 OLI 数据 SPM 与 MODIS 数据 SPM 之间的一致性较好, 相关系数为 0.85, 平均相对误差为 20.5%。误差的主要原因是 OLI 与 MODIS 的传感器的不同。该算法在黄河口水域具有一定的适用性。本文利用时间序列 OLI 数据

分析黄河口悬浮物浓度的时空分布特征, 黄河口悬浮物浓度具有明显的季节变化特征, 主要受风速和输沙量的影响黄河口悬浮物浓度变化存在差异, 风速和输沙量对悬浮物浓度的影响存在一定的时间滞后现象。

参考文献:

- [1] 韦钧, 陈楚群, 施平. 一种实用的二类水体 SeaWiFS 资料大气校正方法[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 118-126.
Wei Jun, Chen Chuqun, Shi Ping. A practical algorithm for atmospheric correction of SeaWiFS data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(4): 118-126.
- [2] 毛志华, 黄海清, 朱乾坤, 等. 我国海区 SeaWiFS 资料大气校正[J]. 海洋与湖泊, 2001, 32(6): 581-587.
Mao Zhihua, Huang Haiqing, Zhu Qiankun, et al. The atmospheric correction algorithm of SeaWiFS data in china seas[J]. Oceanologia EtLimnologia Sinica, 2001, 32(6): 581-587.
- [3] 丁静. 基于神经网络的二类水体大气修正与水色要素反演[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
Ding Jing. The atmospheric correction and three-component retrieval for Casellwater with Neural Network[D]. QINGDAO: China Ocean University, 2004.
- [4] 青松. 渤海盐度和悬浮颗粒粒径的遥感反演及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
Qing Song. Remote Sensing Research and application of Salinity and Suspended Partilce Size of the Bohai sea[D]. QINGDAO: China Ocean University, 2011.
- [5] 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.
- [6] Hu Y, Liu L, Liu L, et al. A Landsat-5 atmospheric aorrection based on MODIS atmosphere products and 6S model[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(5): 1609-1615.
- [7] 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.
Zhou Li, Li Yunmei, Guo Yulong, et al. Atmospheric correction for Case-2 waters using a radiative transfer optimized model.[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 7-15.
- [8] Gordon H R, Wang M. 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.
- [9] Doron M, Bélanger S, Doxaran D, et al. Spectral variations in the near-infrared ocean reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1617-1631.
- [10] Shi W, Wang M. An assessment of the black ocean pixel assumption for MODIS SWIR bands[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(8): 1587-1597.
- [11] Goyens C, Jamet C, Ruddick K G. Spectral relationships for atmospheric correction. II. Improving NASA's standard and MUMM near infra-red modeling schemes.[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21176-21187.
- [12] Wang M, Shi W. Sensor noise effects of the SWIR bands on MODIS-Derived ocean color products[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(9): 3280-3292.
- [13] Jiang L, Wang M. Improved near-infrared ocean reflectance correction algorithm for satellite ocean color data processing[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21657-21678.
- [14] Wang M, Shi W, Jiang L. Atmospheric correction using near-infrared bands for satellite ocean color data processing in the turbid western Pacific region[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 741-753.
- [15] Bailey S W, Franz B A, Werdell P J. Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7521-7527.
- [16] Stumpf R P, Arnone R A, Gould R W, et al. A partially coupled ocean-atmosphere model for retrieval of water-leaving radiance from SeaWiFS in coastal waters[J]. 2003, 206892: 51-59.
- [17] Goyens C, Jamet C, Schroeder T. Evaluation of four atmospheric correction algorithms for MODIS-Aqua images over contrasted coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131(8): 63-75.
- [18] Vanhellemont Q, Greenwood N, Ruddick K. Validation Of MERIS-Derived turbidity and par attenuation using autonomous buoy data[C]//ESA Living Planet Symposium. ESA Living Planet Symposium, 2013.
- [19] He X, Pan D, Mao Z. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 39(4): 897-912.
- [20] Vanhellemont Q, Ruddick K. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 145(8): 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] 青松, 包玉海, 郝艳玲. 基于短波红外波段的乌梁素海 Landsat-8 OLI 数据大气校正[J]. 红外, 2017, 38(3): 21-30.
Qing Song, Bao Yuhai, Hao Yanling. Atmospheric correction of Landsat-8 OLI Data for WuliangshuhaiLakebased on SWIR bands[J]. Infrared, 2017, 38(3) : 21-30.
- [23] 张娇, 张龙军, 宫敏娜. 黄河口及近海表层沉积物中烃类化合物的组成和分布[J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 23-30.

- Zhang Jiao, Zhang Longjun, Gong Minna. The distribution of hydrocarbons in the surface sediments from the Huanghe Estuary and adjacent area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(3): 23-30.
- [24] Nechad B, Ruddick K G, 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(4): 854-866.
- [25] 郭志刚, 杨作升, 雷坤, 等. 东海陆架北部泥质区沉积动力过程的季节性变化[J]. *中国海洋大学学报自然科学版*, 1999, 3: 507-513.
- Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Lei Kun, et al. Seasonal variation of the sedimentary dynamic processes for the mud area in the northern East China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 1999, 3: 507- 513.
- [26] 苏育嵩, 李凤岐, 马鹤来, 等. 东海北部区域底层冷水团的形成及其季节变化[J]. *青岛海洋大学学报*, 1989, S1: 1-14.
- Su Yusong, Li Fengqi, Ma Helai, et al. Formation and seasonal variation of bottom cold water mass in northern area of the East China Sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1989, S1: 1-14.
- [27] 陈瑞瑞, 蒋雪中. 长江河口悬浮泥沙向浙闽沿岸输运近期变化的遥感分析[J]. *海洋科学*, 2017, 41(3): 89-101.
- Chen Ruirui, Jiang Xuezhong. Analysis of suspended sediment variations from the Yangtze Estuary to Zhejiang-Fujian Provincial coastal waters using remotely sensed data[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(3): 89-101.
- [28] 崔廷伟, 张杰, 马毅, 等. 渤海悬浮物分布的遥感研究[J]. *海洋学报*, 2009, 31(5): 10-18.
- Cui Tingwei, Zhang Jie, MA Yi, et al. The study on the distribution of suspended particulate matter in the Bohai Sea by remote sensing[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(5): 10-18.
- [29] 庞重光, 于炜. 渤海表层悬浮泥沙的空间模态及其时间变化[J]. *水科学进展*, 2013, 24(5): 722-727.
- Pang Chongguang, Yu Wei. Spatial modes of suspended sediment concentration in surface water in Bohai Sea and their temporal variations[J]. *Advances in water science*, 2013, 24(5): 722-727.
- [30] 吴昊, 丘仲锋, 张艳萍, 等. 2013 年夏秋季黄、渤海悬浮颗粒物粒径分布特征[J]. *海洋科学*, 2015, 39(12): 91-99.
- Wu Hao, Qiu Zhongfeng, Zhang Yanping, et al. Distribution characteristics of suspended particle size in the Yellow and Bohai Seas in summer and autumn 2013[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(12): 91-99.

The inspection and application of atmospheric correction algorithm in Landsat-8 OLI data

A Ru-han¹, QING Song¹, BAO Yu-hai^{1, 2}

(1. College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolian Key Laborator of Remote Sensing and Geographical Information System, Hohhot 010022, China)

Received: Nov. 1, 2017

Key words: atmospheric correction; landsat-8 OLI; algorithm calibration; Huanghe estuary

Abstract: In this paper, Vanhellemont & Ruddick algorithm was tested in the turbid coastal water. Atmospheric correction of the landsat-8 OLI data in the Yellow River Estuary from 2013-2015 was carried out by using the Vanhellemont & Ruddick algorithm. The OLI reflectance derived from this algorithm was well consistent with the measured hyperspectral data. Its correlation coefficient was 0.95, with the error of 16.4%、17.3% and 25.7% at the wavelength of 483nm, 561nm and 655nm respectively. The concentration of suspended particulate matter obtained from the MODIS was correlated with that from Landsat-8 OLI data, with R of 0.85 and error of 20.5%. This was indicated that this algorithm was suitable for the landsat-8 OLI data in the Yellow River Estuary. On the basis of the time series data from the Landsat-8 OLI, the spatial and temporal distribution characteristics of the suspended particulate concentration were obtained. The spatial temporal changes of SPM mainly was induced by wind speed and river sediment runoff. There was time lag between the suspended particulate matter concentration and sediment runoff and wind speed.

(本文编辑: 李晓燕)