

太湖沿岸水体高分一号影像的邻近效应校正

程春梅^{1**}, 李渊^{2*}, 韦玉春³, 涂乾光¹

¹浙江水利水电学院测绘与市政工程学院, 浙江 杭州 310018;

²浙江工商大学旅游与城乡规划学院, 浙江 杭州 310018;

³南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023

摘要 对于沿岸水体, 传感器接收到的水体辐射信号受到沿岸陆地高反射率的影响, 图像对比度降低, 邻近效应影响显著。有效剔除大气衰减和邻近效应, 准确获取水体表面反射率, 是水色遥感定量反演的重要前提。基于2016年4月29日太湖沿岸水体的实测光谱数据与同步过境的高分一号宽覆盖相机(GF-1/WFV)影像, 使用6S模型剔除大气衰减的影响, 并使用核函数表达大气点扩展函数, 进行邻近效应校正。实验结果表明, 邻近效应校正后的图像更清晰, 对比度增大, 水体细节信息更丰富。与6S校正结果相比, 3个同步实测样点的邻近效应校正结果的平均相对误差分别降低了10.8%, 5.24%, 10.39%, 邻近效应校正改进了水面遥感反射率的辐射探测精度。

关键词 遥感; 大气校正; 邻近效应; 高分一号; 6S模型; 太湖

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.102803

Correction of the Adjacency Effect for GF-1 Image in Coastal Waters of Taihu Lake

Cheng Chunmei^{1**}, Li Yuan^{2*}, Wei Yuchun³, Tu Qianguang¹

¹ College of Geomatics and Municipal Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

² School of Tourism and Urban-Rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

³ Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract For coastal waters, the radiation signal received by a sensor is affected by the high reflectance of the terrestrial land, which can result in a reduced image contrast and significant adjacency effect. Eliminating atmospheric attenuation and the adjacency effect and obtaining accurate water surface reflectance are important prerequisites for quantitative water color remote sensing. Based on the *in situ* spectral data of the coastal waters of Taihu Lake on April 29, 2016 and a synchronous Gaofen-1 wide field of view (GF-1/WFV) image, the 6S model was used to eliminate atmospheric attenuation, and a nuclear function is used to express the atmospheric point spread function to correct the adjacency effect. The experimental results show that the image after correcting the adjacency effect is clearer with an increased contrast and more abundant information regarding the water body. Compared with the correction results of the 6S model, the average relative errors of the three *in situ* synchronous samples after correcting the adjacency effect are reduced by 10.8%, 5.24%, and 10.39%, respectively. Correcting the adjacency effect improves the accuracy of radiation detection of the remote sensing reflectance above water surface.

Key words remote sensing; atmospheric correction; adjacency effect; Gaofen-1; 6S model; Taihu Lake

OCIS codes 280.4788; 010.1290

收稿日期: 2018-04-18; 修回日期: 2018-04-28; 录用日期: 2018-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(41471283, 41501374)、浙江省自然科学基金(LQ16D010001)

* E-mail: liyuannjnu@163.com; ** E-mail: Chengcm@zjweu.edu.cn

1 引言

水色遥感定量反演中,传感器接收到的辐射信号包括大气程辐射、反映水体信息的离水辐射,以及周围背景像元的交叉辐射,即邻近效应^[1]。邻近效应会使遥感图像中地物边缘变模糊,对比度降低。对于沿岸水体,水体辐射信号受到沿岸陆地高反射率的影响,邻近效应影响更为显著。传感器接收到的有效离水辐射信号仅占大气层顶总辐亮度的10%左右^[2],因此,有效剔除大气和邻近像元效应的干扰是水色遥感定量反演的首要问题^[3]。

近几十年来人们对卫星观测陆地信息中的邻近效应问题开展了大量研究,建立了较多考虑邻近像元影响的大气校正模型^[4-6]。然而,这些研究大多考虑陆地区域,很少有研究专门解决近岸水体的邻近效应^[7-8]。对于沿岸水体,除了要考虑大气的吸收和散射所引起的辐射衰减,还要考虑沿岸陆地的地表反射。这是因为沿岸陆地特别是高反射率的城市,地表反射对邻近低反射率的水体像元影响(邻近效应)显著。Odermatt等^[9]认为邻近效应导致近岸水体像元在550 nm处的气溶胶光学厚度(AOD),进而影响基于中分辨率成像光谱仪(MERIS)数据的Constance河流水质反演效果。Bulgarelli等^[8]的模拟结果表明,海洋水色传感器探测到的、距离岸边几千米范围的水体像元,在可见光和近红外波段均受到十分显著的邻近效应的影响。

随着高空间分辨率遥感影像应用的普及,应用高分影像进行水色遥感反演的研究增多。目前针对高分影像水色遥感产生了许多大气校正算法^[10-13],但这些算法较少考虑邻近效应的影响。随着分辨率的提高,像元内的混合像元问题逐渐转变成了像元间的邻近效应问题。因此,与中低空间分辨率遥感影像相比,高空间分辨率遥感影像的大气校正更容易导致邻近效应问题^[14]。Kaufman^[5]的研究表明,邻近效应的影响与传感器分辨率的关系密不可分,当传感器空间分辨率小于大气分子和气溶胶标高时,邻近效应的影响不可忽略,邻近效应是进行精确的定量遥感需要考虑的因素。Lyapustin等^[15]研究指出,当对卫星星下点分辨率高于1 km的遥感影像进行大气校正时,必须充分考虑邻近效应的影响,随着星下点分辨率的提高,邻近效应会越来越显著。

因此,使用高空间分辨率的遥感影像进行沿岸水体的水质参数遥感反演时,尤其要考虑邻近效应校正的问题。本文针对高分一号宽覆盖相机(GF-

1/WFV)影像,利用2016年4月29日太湖地区的实测光谱数据与同步过境的WFV影像,使用6S模型去除大气衰减,并使用核函数表达大气点扩展函数,进行邻近效应校正。比较邻近效应校正结果与同步实测样点的遥感反射率,讨论邻近效应校正对基于高分影像的沿岸水体像元辐射探测精度的改进作用。

2 研究区与数据

太湖位于经济发展最具活力的长江三角洲南部,是我国第三大淡水湖泊。太湖沿岸城市密集,长期的高强度开发导致太湖地区生态环境恶化。尤其是平原河网区开发程度较重的太湖西北部,工业污染严重,入湖河流水体污染导致水环境问题严重。本研究以太湖西北部为研究区,2016年4月29日在该地区进行野外采样,其中与GF-1/WFV影像过境准同步的样点共有3个,研究区范围和实测样点分布如图1所示。

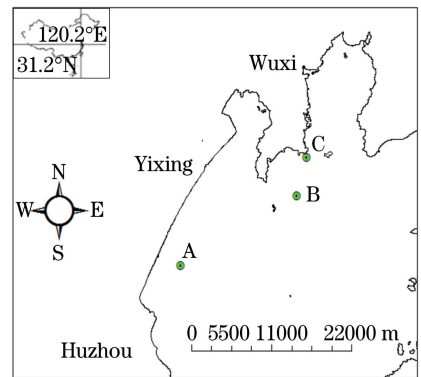


图1 研究区和现场同步样点

Fig. 1 Study area and *in situ* synchronous samples

野外光谱测量使用二类水体水面以上光谱测量方法^[16],每个样点采集10条光谱数据,选取每个样点重复测量的遥感反射率的中值作为该点的反射率。在测量得到的光谱曲线中,选择350~900 nm的数据计算遥感反射率^[16]。基于GF-1/WFV影像的光谱响应设置(来自中国资源卫星应用中心网站),利用地面实测光谱反射率值模拟计算WFV各个波段的等效遥感反射率。

获取了与野外实验同步的2016年4月29日太湖地区WFV3传感器影像,卫星过境时间为北京时间11:26,云覆盖率为3%,影像质量良好。以研究区地形图为基准,对该影像进行几何校正,校正后的误差控制在1个像元范围以内。对几何校正后的影像进行裁剪,得到覆盖太湖沿岸水体实测样点

的影像。

3 算法原理

3.1 表观反射率计算

辐射定标公式为:转换后辐亮度 $L(\lambda)$ 等于偏置参数和卫星载荷观测值积与波段增益的和。根据辐射定标公式对 GF-1/WFV 图像进行定标。WFV 相机的增益、偏置参数均可从中国资源卫星应用中心网站获取。

利用定标后的辐亮度数据,计算表观反射率(大气层顶反射率):

$$\rho_{\text{TOA}} = \frac{\pi \cdot L \cdot d^2}{E_{\lambda} \cos \theta_s}, \quad (1)$$

式中: L 为辐亮度; d 为日地相对距离,其值在 1 左右,随日期略微变动,本研究取值为 1; θ_s 为太阳天顶角; E_{λ} 为波段平均太阳辐射值,可根据 GF-1/WFV 传感器的光谱响应函数和对应区间的太阳光谱函数来计算。

3.2 大气衰减去除

对于理想地-气辐射传输情况,即假设陆地表面均一且为朗伯体、大气性质均一且垂直均匀变化,忽略邻近效应和地-气多次反弹,卫星传感器所接收的

大气层顶表观反射率可表示为

$$\rho_{\text{TOA}} = \frac{\rho^*}{1 - \rho^* S} T(\theta_s) T(\theta_v) + L_p, \quad (2)$$

式中: S 为大气向下的半球反照率; L_p 为大气程辐射; $T(\theta_s)$ 和 $T(\theta_v)$ 分别为太阳入射方向和观测方向上的大气透射率; ρ^* 为地表反射率。(2)式中的 S 、 L_p 、 $T(\theta_s)$ 和 $T(\theta_v)$ 等与大气相关的参数可以由 6S 辐射传输方程计算得到。

6S 模型的输入参数见表 1,其中观测几何来自卫星自带参数;使用自定义的大气模式,从全球气溶胶监测网(AERONET)下载 2016 年 4 月 29 日的太湖站地基观测所得的气溶胶观测结果,获取水汽和臭氧含量;气溶胶模式使用大陆型气溶胶,基于 AERONET 观测数据计算气溶胶光学厚度值。由于 AERONET 上无法提供 550 nm 处的气溶胶光学厚度,因此使用 AERONET 提供的 440, 500, 675, 870 nm 四个通道处的气溶胶光学厚度值,进行二项式拟合,通过插值得到 550 nm 处的气溶胶光学厚度。使用 GF-1/WFV 传感器的高度和光谱条件设置,假定地面为朗伯均一地表,地物类型为湖水。求解 6S 辐射传输方程,获取 S 、 L_p 、 $T(\theta_s)$ 和 $T(\theta_v)$ 等参数,并计算得到地表反射率 ρ^* 。

表 1 6S 模型输入参数

Table 1 Input parameters of 6S model

Parameter	Value
Satellite observation geometry /($^{\circ}$)	0 (user-defined), 17.505, 154.426, 8.7951, 282.283
Atmospheric mode	8 (custom)
Evaporation of H ₂ O-vapor /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	1.75
Content of O ₃ /($\text{cm} \cdot \text{atm}$)	0.317 (standard atmospheric pressure)
Aerosol mode	1 (continental)
Aerosol concentration	0 (input of AOD instead of visibility)
AOD at 550 nm	1.0023
Target altitude /km	0
Sensor altitude /km	-645
Spectral range / μm	0.45-0.52; 0.52-0.60; 0.63-0.69; 0.76-0.90
Surface model	0 (uniform surface); 0 (BRDF not considered)
Feature type	4 (lake)

Note: atm is standard atmospheric pressure; BRDF is bidirectional reflectance distribution function.

3.3 邻近效应校正

考虑背景像元邻近效应的干扰,上面求得的地表反射率 ρ^* 是由目标像元与背景像元辐射共同作用的结果。其中背景像元的贡献可由背景像元反射率与大气点扩展函数的卷积计算获得。目前常用的大气点扩展函数求解方法包括蒙特卡罗模拟^[17]、解析方程近似^[18-19]和人工神经网络模拟^[20]等,其中蒙特卡罗模拟基于大量统计的结果,精度与计算次数

相关,较为复杂^[21]。本研究直接使用一种简单的核函数表达大气点扩展函数^[6],其定义为

$$H(\xi, \eta) = \frac{\exp(-R^2)}{\iint_{0 \leq R \leq \infty} \exp(-R^2) d\xi d\eta}, \quad (3)$$

式中: $H(\xi, \eta)$ 为点扩展核函数, ξ 和 η 是空间点的位置,且 $\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\xi, \eta) d\xi d\eta = 1$; R 为背景像元离目

标像元的距离,且 $R = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ 。如果考虑像元的离散形式,真实地表反射率 ρ 与 ρ^* 之间的关系可以表示为^[6]

$$\rho(x, y) = \rho^*(x, y) + \left\{ \frac{t_d(\theta_v)}{T(\theta_v)} \left/ \left[1 - \frac{t_d(\theta_v)}{T(\theta_v)} \right] \right. \right\} \cdot \left[\frac{\rho^*(x, y) - \frac{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N \rho^*(x-i, y-j) \cdot \exp(-r^2)}{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N \exp(-r^2)}}{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N \exp(-r^2)} \right], \quad (4)$$

式中: $t_d(\theta_v)$ 为观测方向上的大气漫射透射率函数,可由 $T(\theta_v)$ 求解可得: $T(\theta_v) = t_d(\theta_v) + \exp[-\tau(\theta_v)/\cos\theta_v]$, 其中 $\tau(\theta_v)$ 为对应垂直方向上的大气光学厚度; $r = a \cdot \sqrt{i^2 + j^2}$, a 为像元尺寸,单位为 km; x, y 为像元坐标; N 为窗口半径,表示邻近效应的影响范围,在此取 20 个像元。

4 结果与讨论

4.1 校正前后图像特征变化

GF-1/WFV 影像辐射定标后的大气层顶反射率、6S 模型校正后影像、邻近效应校正后影像的各波段(B1, B2, B3, B4)像元反射率的直方图分布,如图 2 所示其中 B1 为蓝波段(450~520 nm), B2 为

绿波段(520~600 nm), B3 为红波段(630~690 nm), B4 为近红外波段(760~900 nm)。比较大气校正前后像元反射率的直方图分布,如图 2(a)和(b)所示,发现蓝波段反射率分布左移,大气校正后蓝波段反射率明显降低。这是由于大气校正消除了大气分子瑞利散射,瑞利散射的强度与波长 4 次方成反比,因此蓝光波段瑞利散射远大于绿光和红光波段。此外,从图 2(a)和(b)可见,大气校正去除了大气中水汽、臭氧和气溶胶粒子对地物反射率的影响,所有波段的反射率值均降低,校正后反射率更加真实。对比邻近效应校正前后像元反射率的直方图分布,如图 2(b)和(c)所示,可见邻近效应校正后反射率直方图的分布区间更宽,不同地物对应到更多不同的反射率值,地物信息更加丰富。与 6S 大气校正结果相比,邻近效应校正后影像的对比度明显提升。

比较邻近效应校正前后遥感影像的真彩色合成图,如图 3(a)和(b)所示,可以看出邻近效应校正后遥感影像更清楚,沿岸水体边界清晰,地物类型更加丰富。比较邻近效应校正前后西太湖入湖口的近红外波段(B4)灰度图,如图 3(c)和(d)所示,可以看出邻近效应校正后影像中水面的纹理更丰富,沿岸水体地物对比度提高,水体信息量更加丰富。

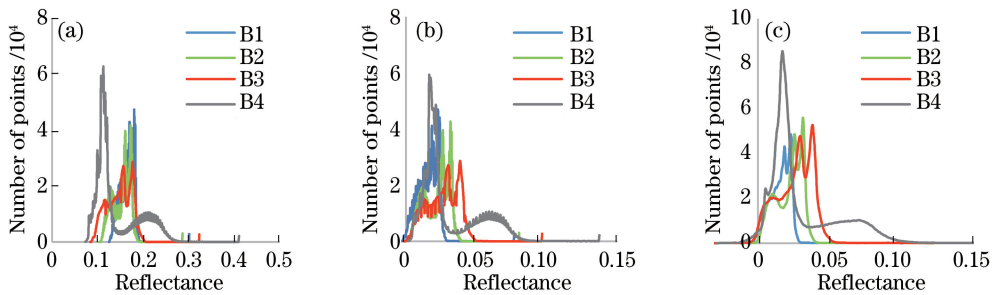


图 2 邻近效应校正前后影像像元反射率直方图。(a)校正前;(b)6S校正;(c)邻近效应校正

Fig. 2 Histograms of pixel reflectance before and after correcting the adjacency effect. (a) Before correction; (b) 6S correction; (c) adjacency effect correction

4.2 校正前后光谱特征变化

绘制一条太湖沿岸地物[图 3(a)中红线所示]的光谱剖面图,比较蓝波段(B1)和近红外波段(B4)邻近效应校正前后的像元光谱反射率变化,如图 4 所示。由图 4 可见,经过邻近效应校正后,高反射率像元反射率有所抬升,而低反射率像元反射率降低,光谱对比度增强,表达的地物信息更为真实。

选取太湖地区与 WFV 影像过境时间同步采样的实测样点,对比实测光谱、6S 模型校正后反射

率以及邻近效应校正后反射率,结果如图 5 可以所示。由图 5 可以看出,样点 A 经过邻近效应校正后,蓝波段和绿波段光谱有所抬升,而近红外波段则有所下降,与实测光谱更为接近。样点 B 和样点 C 在蓝波段和绿波段邻近效应校正前后结果相差不大,但在红波段和近红外波段邻近效应校正后的光谱反射率与实测光谱更为接近。邻近效应校正后,各波段光谱反射率对比度增强,反演的水体遥感反射率精度更高。

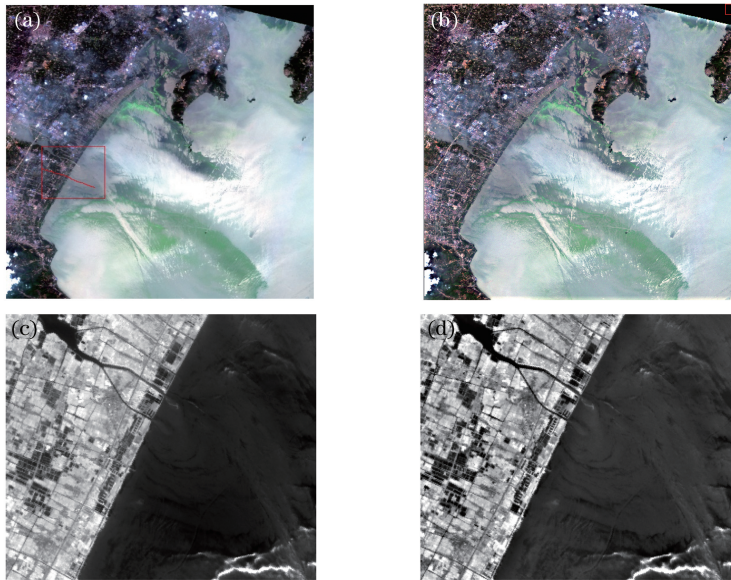


图 3 邻近效应校正前后太湖 WFV 影像对比。(a)、(b)真彩色合成图;(c)、(d) B4 波段灰度图
Fig. 3 Comparison of the WFV images of Taihu Lake before and after correcting the adjacency effect.

(a), (b) True color composite images; (c), (d) B4 grayscale images

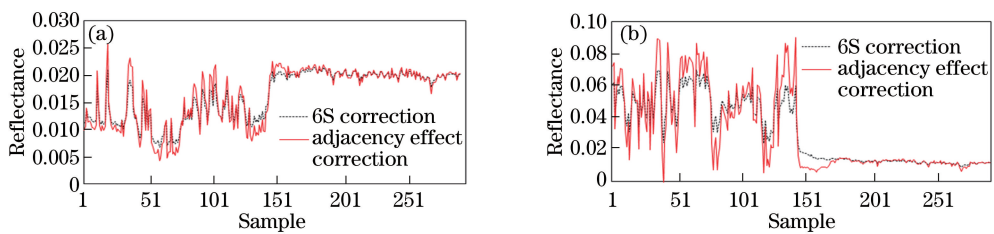


图 4 邻近效应校正前后 B1 和 B4 波段剖面光谱。(a) B1;(b) B4

Fig. 4 Spectral profiles of B1 and B4 before and after correcting the adjacency effect. (a) B1; (b) B4

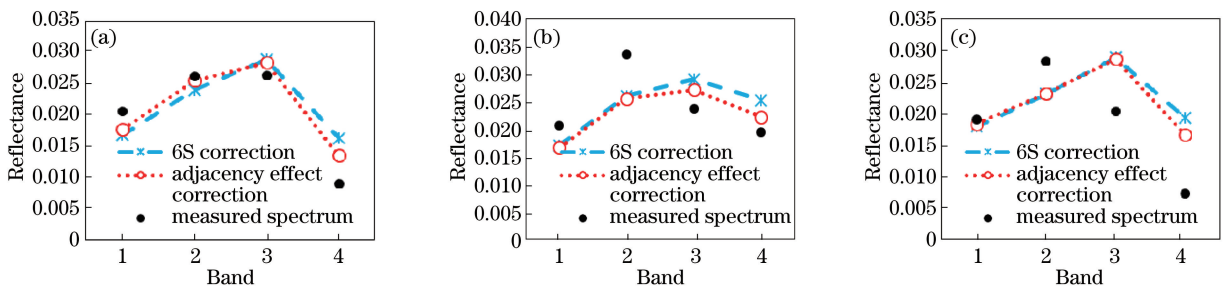


图 5 同步实测样点邻近效应校正前后光谱反射率。(a)样点 A;(b)样点 B;(c)样点 C

Fig. 5 Spectral reflectance before and after correcting the adjacency effect of the *in situ* synchronous samples.

(a) Sample A; (b) sample B; (c) sample C

样点 A 经过 6S 校正的相对误差为 29.55%，邻近效应校正相对误差为 18.76%；样点 B 经过 6S 校正的相对误差为 23.28%，邻近效应校正相对误差为 18.04%；样点 C 经过 6S 校正的相对误差为 58.54%，邻近效应校正相对误差为 48.15%。与 6S 校正结果相比，3 个样点经过邻近效应校正后平均相对误差分别降低了 10.8%，5.24%，10.39%。3 个

样点与岸边的距离分别为 3.5, 4.5, 0.5 km，其中样点 B 离岸最远，邻近效应校正对样点 B 的精度结果的改进作用弱于其他两个样点。邻近效应校正对样点 A 和 C 的精度的改进作用均较明显，其中 C 点离岸最近，但由于采样时水体中存在较多的藻颗粒，干扰了正常水体光谱的信号，大气校正精度(邻近效应校正前后平均相对误差分别为 58.54% 和 48.15%)

低于样点 A(邻近效应校正前后平均相对误差分别为 29.55%和 18.76%),因此邻近效应校正对样点 C 的精度的改进效果略低于样点 A。邻近效应校正提高了水面遥感反射率的传感器探测精度,且对离岸较近的水体像元改进作用更明显。

4.3 邻近效应校正结果讨论

与开阔的大洋水体不同,近岸湖泊水体空间尺度较小,水质空间差异性明显,一般需要采用中高空间分辨率的遥感数据^[22]。一方面,近岸水体和沿岸陆地光谱反射率差异较大,低反射率的水体像元更容易受到高反射率沿岸地物的影响,邻近效应更加显著^[23];另一方面,遥感影像的像元尺度越小,邻近效应影响越显著^[24],高空间分辨率影像尤其要考虑大气校正中的邻近效应影响^[4,15]。研究表明^[8],沿岸地物的邻近效应对水体像元的影响范围一般可以达到几千米。Santer 等^[7]用 5S 代码模拟反射率为 30%的表面包围下的半径为 20 km 的圆形暗目标(湖泊水体,反射率为 0),发现其中心位置约有 0.15%的反射率偏差,且该偏差在边缘处增加到 2.31%;如果圆形湖的半径为 5 km,圆湖中心像元所受到背景反射的邻近效应贡献约为 50%。当目标反射率和邻近像元反射率差异大,气溶胶光学厚度大时,散射相函数对称性越强,卫星传感器的表观反射率对邻近像元反射率越敏感,邻近效应也越明显,邻近效应的影响范围也会扩大到几十千米^[1]。因此,研究近岸水体邻近效应的去除方法是改进近岸水体水色信号辐射探测精度的必要手段。

本研究在使用 6S 模型进行大气衰减校正后,基于大气点扩展函数进行了邻近效应校正,校正后的光谱反射率精度更高。与 6S 大气校正结果相比,邻近效应校正后的结果显著改进了图像对比度,提高了反演的地物反射率的精度(图 3、图 5)。在利用传感器获取沿岸水体辐射信号时,大气中水汽、分子、气溶胶等共同作用导致大气透明度降低,且沿岸陆地高反射率背景像元对水体辐射信号造成干扰,卫星反演的水体离水辐射率分布范围比实际狭窄,图像中目标物对比度下降。经过邻近效应校正后,还原了真实地物的反射率,图像的亮度和清晰度增加,层次更加丰富,能够识别出更多的水体信息。6S 辐射传输模型使用地表环境因子来处理邻近效应问题,但实际计算中需要知道水平非均一地面上的漫反射效应,而这种漫反射效应一般是未知的^[25]。近岸水体的邻近效应校正显著提高了大气校正后地表反射率的精度,减少了反演的像元反射率与真实地

面实测光谱间的偏差,对于水质参数遥感反演具有很大的应用价值。

5 结 论

应用 6S 辐射传输模型进行大气衰减去除,并使用核函数表达大气点扩展函数,对覆盖太湖沿岸水体的 GF-1/WFV 影像进行邻近效应校正。结果表明,邻近效应校正后高分影像对比度增强、层次变强,表现出更丰富的地物信息。与直接的 6S 大气校正结果相比,邻近效应校正后的水体像元遥感反射率与同步实测样点的光谱反射率更接近,平均相对误差分别降低了 10.8%,5.24%,10.39%。高分影像的大气校正必须考虑像元间的邻近效应,邻近效应去除对基于高分影像的沿岸水体像元的辐射探测和水质参数遥感反演具有重要意义。

高分影像邻近效应校正的关键是确定大气点扩展函数;精确表达适合高分一号水色遥感反演的大气点扩展函数,并与基于蒙特卡罗模拟的结果进行对比,是提高高分一号影像邻近效应校正精度的关键问题。后续研究将进一步分析与确定针对近岸水体高分影像的大气点扩展函数,定量评估近岸水体水色遥感反演中邻近效应的影响,并构建高精度的邻近效应校正模型。

参 考 文 献

- [1] Tang X. Research on adjacency effect analysis and atmospheric correction method of high resolution remote sensing data [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
汤兴. 高分辨率遥感图像的邻近效应分析及大气校正方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- [2] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [3] Wang M, Antoine D, Deschamps P Y, *et al.* Atmospheric correction for remotely-sensed ocean-color products[M]. Dartmouth: International Ocean-Colour Coordinating Group, 2010: 15-58.
- [4] Kaufman Y J. Effect of the Earth's atmosphere on contrast for zenith observation [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1979, 84(C6): 3165-3172.
- [5] Kaufman Y J. Atmospheric effect on spatial resolution of surface imagery [J]. Applied Optics, 1984, 23(19): 3400-3408.
- [6] Liu C Y, Chen C, Zhang S Q, *et al.* Atmospheric

- adjacency effect correction of ETM images [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(9): 2529-2532.
- 刘成玉, 陈春, 张树清, 等. ETM 图像大气邻近效应校正[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(9): 2529-2532.
- [7] Santer R, Schmechtig C. Adjacency effects on water surfaces: primary scattering approximation and sensitivity study[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(3): 361-375.
- [8] Bulgarelli B, Kiselev V, Zibordi G. Simulation and analysis of adjacency effects in coastal waters: a case study[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(8): 1523-1545.
- [9] Odermatt D, Kiselev V, Heege T, *et al.* Adjacency effect considerations and air/water constituent retrieval for Lake Constance[C] // Conference on the 2nd MERIS/(A) ATSR User Workshop, September 22-26, 2008, Frascati, Italy. 2008(ESA): SP-666.
- [10] Wang Z T, Li X Y, Li S S, *et al.* Quickly atmospheric correction for GF-1 WFV cameras [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(3): 353-360.
王中挺, 李小英, 李莘莘, 等. GF-1 星 WFV 相机的快速大气校正 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(3): 353-360.
- [11] Sun L, Yu H Y, Fu Q Y, *et al.* Aerosol optical depth retrieval and atmospheric correction application for GF-1 PMS supported by land surface reflectance data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(2): 216-228.
孙林, 于会泳, 傅俏燕, 等. 地表反射率产品支持的 GF-1 PMS 气溶胶光学厚度反演及大气校正 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(2): 216-228.
- [12] Hou X Z. Atmospheric correction and its evaluation of Gaofen-1 remote sensing image [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
侯旭洲. 高分一号卫星遥感影像大气校正与效果评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [13] Liu J, Wang L M, Yang L B, *et al.* GF-1 satellite image atmospheric correction based on 6S model and its effect[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(19): 159-168.
刘佳, 王利民, 杨玲波, 等. 基于 6S 模型的 GF-1 卫星影像大气校正及效果 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 159-168.
- [14] Tang X, Yi W N, Du L L, *et al.* Adjacency effect correction study of GF-1 satellite multi-spectral remote sensing images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0228003.
汤兴, 易维宁, 杜丽丽, 等. 高分一号卫星多光谱遥感图像邻近效应校正研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0228003.
- [15] Lyapustin A I, Kaufman Y J. Role of adjacency effect in the remote sensing of aerosol[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D11): 11909-11916.
- [16] Tang J W, Tian G L, Wang X Y, *et al.* The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method [J]. *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 [J]. *遥感学报*, 2004, 8(1): 37-44.
- [17] Xu X R, Wang P R. Computing atmospheric point spread function by Monte-Carlo method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1999, 3(4): 268-278.
徐希孺, 王平荣. 用蒙特卡罗方法计算大气点扩散函数 [J]. *遥感学报*, 1999, 3(4): 268-278.
- [18] Liang S, Fang H, Chen M. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. I. Methods [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2490-2498.
- [19] Wang Q, Chen X, Ma J W, *et al.* A comparative study of two remote sensing image adjacency effect correction algorithms based on SHDOM empirical equation and synchronized measured spectral data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3342-3348.
王倩, 陈雪, 马建文, 等. 基于 SHDOM 经验方程和基于同步实测光谱数据的遥感影像邻近效应校正算法对比研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3342-3348.
- [20] Wang H D, Ma X S, Yang Z, *et al.* Computing the atmospheric point spread function by artificial neural networks [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 102801.
王海东, 马晓珊, 杨震, 等. 人工神经网络计算大气点扩展函数 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 102801.
- [21] Xiao Q, Liu Q H, Li X W, *et al.* Analysis and correction of atmospheric cross radiation for high geometric resolution airborne remote sensing data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(6): 625-633.
肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 高分辨率机载遥感数据的交叉辐射影响及其校正 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(6): 625-633.
- [22] Matthews M W. A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-

- coastal transitional waters [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(21): 6855-6899.
- [23] Kiselev V, Bulgarelli B, Heege T. Sensor independent adjacency correction algorithm for coastal and inland water systems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 157: 85-95.
- [24] Ma X S, Guo X Y, Meng X, *et al.* Simulation and analysis of the adjacency effect in earth-imaging process of the optical remote sensing [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(2): 250-256.
- 马晓珊, 郭晓勇, 孟新, 等. 光学遥感对地成像过程中的邻近效应模拟分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(2): 250-256.
- [25] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.