

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.04.010

环境二号卫星多光谱图像的薄云检测及去除

郭庭威^{1,2}, 黄红莲^{1*}, 孙晓兵¹, 刘晓¹, 提汝芳¹

(1 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,
安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 在遥感图像中, 大面积的薄云会使得地物信息被遮蔽, 从而对后续图像的判读以及应用产生极大的影响。为消除卫星图像中薄云对下垫面的影响, 开发了针对多光谱图像的薄云检测与去除算法。该算法首先利用蓝绿波段合成外推波段, 通过暗像素搜索, 生成薄云厚度图 (HTM) 和薄云掩膜图, 进而得到无云区像元与云区像元; 再计算图像每个波段的 HTM, 利用外推波段的 HTM 与每个波段的 HTM 求得每个波段的线性回归系数, 由该系数对图像进行薄云去除。将该方法应用于环境减灾二号 (HJ-2A/B) 卫星的多光谱图像, 研究结果表明, 对不同地表类型, 薄云去除后图像质量均得到明显的提升, 能够清晰地展现出薄云下覆盖的地物信息, 并且不影响无云区域的图像质量。利用该算法进行薄云去除后, 卫星多光谱图像的清晰度、对比度和标准差都有显著的提升, 为后续图像应用提供了质量保障。

关键词: 遥感影像; 薄云去除; 云检测; 薄云厚度图; 环境减灾二号卫星

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)04-383-018

Detection and removal of thin clouds in multispectral images of HJ-2A/B satellites

GUO Tingwei^{1,2}, HUANG Honglian^{1*}, SUN Xiaobing¹, LIU Xiao¹, TI Rufang¹

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In remote sensing images, large areas of thin clouds can obscure ground object information, which has a great impact on subsequent interpretation and application of the images. In order to eliminate the influence of thin clouds on the underlying surface in satellite images, an algorithm for thin cloud detection and removal in multispectral images is developed. In the algorithm, the blue-green bands is used to synthesize extrapolated bands firstly, and then cloud thickness map (HTM) and thin cloud mask map are generated through dark pixel search, thereby obtaining cloud-free area pixel and cloud area pixel. Secondly,

基金项目: 高分重大专项 (30_Y20A010_9007_17/18)

作者简介: 郭庭威 (1996-), 重庆人, 硕士研究生, 主要从事遥感图像大气校正算法以及软件方面的研究。E-mail: tingweigu@163.com

导师简介: 黄红莲 (1980-), 女, 山东嘉祥人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光学遥感信息处理及应用、光学偏振成像仿真和大气特性参数反演等方面的研究。E-mail: hlhuang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2023-02-09; 修改日期: 2023-04-06

*通信作者。

the HTM of each band is calculated, then both of the HTM of the extrapolated band and the HTM of each band are used to obtain the linear regression coefficient of each band. Finally, the images are subjected to thin cloud removal based on the coefficients. The method is applied to the multispectral images of Huanjing Jianzai-2A/B (HJ-2A/B) satellites. The results show that for different surface types, the image quality is significantly improved after removing thin clouds, and the ground object information covered by thin clouds can be clearly displayed, without affecting the image quality of cloud-free areas at the same time. After using this algorithm to remove thin clouds, the clarity, contrast and standard deviation of the multispectral images can be significantly improved, which provides quality assurance for subsequent image applications.

Key words: remote sensing image; thin cloud removal; cloud detection; haze thickness map; HJ-2 satellite

0 引言

近年来, 遥感技术的飞速发展使得遥感卫星可以拍摄到更加清晰的卫星图像。通过遥感卫星获取到的大量遥感图像为天气预报、自然灾害监测和军事观察等领域提供了重要的指导与参考^[1]。然而由于大气中云层的存在, 遥感图像中会出现云层遮挡住地物的情况, 使得遥感图像难以利用, 这给遥感图像的应用带来了极大的困扰。因此去掉遥感图像中的云层干扰、提高图像的利用率具有极其重要的意义。

云层主要分为厚云和薄云两类。薄云指云的光学厚度较小, 有着较为良好的透光性, 可以较为容易地透过太阳辐射, 通常呈现半透明的状态^[2]。薄云下覆盖了大量的地物信息, 并且薄云会散射和反射太阳光线, 导致进入传感器中的地物光谱失真^[3]。目前, 针对光学遥感卫星图像薄云去除的算法根据算法处理域的区别大致划分为基于频率域和空间域这两大类。基于频率域的薄云去除算法的原理是根据在频率域中薄云表现为低频这一特性进行薄云去除, 其中具有代表性的包括同态滤波器与小波变换两种去云算法^[4,5], 这两种算法的共同问题是在算法处理过程中会将图像的低频信息屏蔽掉, 从而导致图像中无云区域的地物信息会被过滤掉, 使得薄云去除后遥感图像失去原有的细节信息。基于空间域的去云算法丰富多样。其中利用图像光谱特性进行去云的代表性算法有雾度优化转换 (HOT) 算法^[6], 该算法主要是利用光谱响应对各种地物类型表现不同的原理以及在晴空条件下光谱响应与每个波段之间的对应关系, 该算法对于覆盖在植被等地物类型上空的薄云有比较好的去除效果, 但是对于地物类型为高亮区域的情况会产生过校正问题。基于辐射传输模型进行去云的代表性算法有基于经验和辐射传输模型 (RTM-based) 的去云算法^[7], 该算法应用于单一的地物类型 (比如植被) 时往往表现出比较好的性能, 但是针对复杂地物类型反演得到的薄云反射率往往包含丰富的地物信息, 这会对算法的性能造成一定影响。基于空间域的去云算法还包括利用独立成分分析 (ICA) 的薄云去除算法^[8], 该算法利用变换将图像和卷云探测波段转变成相应数量的独立分量, 去除与卷云波段相似的分量后再逆变换, 最终得到去除薄云的图像, 该算法满足大部分应用场景, 但是也会存在不能将云干扰彻底清除的情况。基于图像转换进行去云的算法, 主要是把含有云的遥感图像进行特定的变换使其转变为另外一类不同的信号, 通过转变将图像中含有的云成分与地物信息进行分离, 其中缨帽变换是一种基于图像物理特征的经验线性变换^[9], 通过转换得到变换分量, 去除分量中的第四分量后再进行逆变换, 最终可得到去除薄云后的图像。而基于薄云厚度图 (HTM) 估计算法^[10]是通过在整个图像上进行局部非重

叠搜索暗目标,对暗目标的搜索使得能够建立一个HTM,利用对薄云影响的简化加法模型的假设,从薄云图像中减去HTM可以恢复传感器的无云噪声的信号。该算法效率较高,充分考虑了图像中各个波段对云噪声的敏感性,并且该算法对无云区域影响较小。

环境减灾二号卫星01组A、B(HJ-2A/B)卫星主要是应用于灾害与环境监测的对地遥感卫星,发射于2020年9月27日,其中每颗卫星配置了4类光学载荷^[11],包括16 m分辨率相机、红外相机、大气校正仪、高光谱成像仪。其中16 m相机以推扫方式在距离地面645 km的太阳同步轨道对地面景物成像,所得图像包含蓝、绿、红、近红外和红边5个波段,分别成像在4片12000像元长线阵CCD探测器上,空间分辨率优于16 m,每块成像幅宽大于200 km,总幅宽800 km,总视场角大小为62.6°^[12]。

本文针对HJ-2A/B多光谱图像的特点,研究HTM算法的关键因素:外推蓝波段、薄云掩膜和每个波段HTM,图中非重叠窗口大小设置,使用多光谱相机拍摄到的遥感影像作为实验数据,针对不同地物类型分别选取不同的遥感影像,将HTM算法应用在所选取的遥感图像上,恢复薄云下地物信息。

1 基本原理

有云时,遥感图像的生成主要包含两类电磁波辐射,当太阳光线照射在云层上时,一部分会直接反射给传感器^[13],另一部分则会透过云层照射到地物上后反射再穿过云层干扰后传递给传感器。假设地物信息中任何对象到传感器的距离为常数,并且薄云影像区域的信号主要由两部分因素组成,可以将简化的成像模型描述为^[14]

$$L_{\text{sensor}} = L_0 + H, \quad (1)$$

式中 L_{sensor} 表示获取的辐射, L_0 是无云路径辐射和表面反射辐射的总和, H 是薄云分量。

假设灰度(DN)值到辐照度的转换是线性的,该方法同样适用于每个波段的DN值。式(1)可以表示为

$$d_{\text{sensor},i}(x,y) = d_i(x,y) + H_{\text{TM},i}(x,y), \quad (2)$$

式中 $d_{\text{sensor},i}(x,y)$ 是通过传感器获取到的DN值, i 是波段号, (x,y) 是遥感图像中像素的坐标, $d_i(x,y)$ 是不受薄云影响的DN值, $H_{\text{TM},i}(x,y)$ 是以DN值表示的各波段的薄云厚度图。因此,通过从记录的 $d_{\text{sensor},i}(x,y)$ 中减去 $H_{\text{TM},i}(x,y)$ 以得到无云的图像。

1.1 HTM

HTM主要是使用局部非重叠窗口搜索图像上的暗像元得到的,逐像元搜索暗像元可能导致在非阴影或明亮对象上选择像元,所以逐像元搜索不能用于估计薄云的厚度。并且非重叠窗口会增加在阴影区域上定位暗像元的机会,较大的窗口更加容易检测到暗像元,但是一些边界区域可能会被平滑,导致HTM的值偏低,然而更小的窗口有利于更好地评估薄云厚度。通过窗口搜索到的暗像元存储在一个矩阵中,通过中值滤波器平滑,并插值(三次插值)到原始图像的大小。

高亮地物会干扰HTM的准确估计,必须检测这些地物,将其标记为不适合进行HTM评估。这些对象通过分割方法进行标记,并从搜索中排除,使用表观反射率可以获得较准确的判断结果^[15]

$$P_{\text{bright}} = \rho^*(d_{\text{NIR}}) \geq 0.1, \quad (3)$$

并且

$$\rho^*(d_{\text{blue}}) \geq T_{\text{blue}}, \quad (4)$$

或者

$$\rho^*(d_{\text{red}}) \geq T_{\text{red}}, \quad (5)$$

式中 P_{bright} 代表高亮区域像元点, $\rho^*(d_{\text{NIR}})$ 是近红外波段的表观反射率, d_{NIR} 代表近红外波段的 DN 值, $\rho^*(d_{\text{blue}})$ 是蓝波段的表观反射率, d_{blue} 代表蓝波段的 DN 值, $\rho^*(d_{\text{red}})$ 是红波段的表观反射率, d_{red} 代表红波段的 DN 值, 并且蓝、红波段的表观反射率阈值 T_{blue} 、 T_{red} 为

$$T_{\text{blue}} = \bar{\rho}^*(d_{\text{blue}}) + 2 \text{STDEV}[\rho^*(d_{\text{blue}})], \quad (6)$$

$$T_{\text{red}} = \bar{\rho}^*(d_{\text{red}}) + 2 \text{STDEV}[\rho^*(d_{\text{red}})], \quad (7)$$

式中 $\bar{\rho}^*(d_{\text{blue}})$ 、 $\bar{\rho}^*(d_{\text{red}})$ 是蓝、红波段表观反射率的均值, $\text{STDEV}[\rho^*(d_{\text{blue}})]$ 、 $\text{STDEV}[\rho^*(d_{\text{red}})]$ 是蓝、红波段表观反射率的标准差。

在多光谱图像中, 应在具有最小地面反射率和最大薄云信号分量的波段中搜索暗像元, 蓝波段比较适合, 红波段和近红外波段的地面反射率较高, 不适用于陆地。

然而, 直接使用蓝波段会导致蓝波段过度拉伸, 为了避免这个问题, 通过对蓝波段和绿波段进行线性外推, 创建一个新合成波段 $b_{\text{ext}}(x, y)$, 其表达式为

$$b_{\text{ext}}(x, y) = B(x, y) + [B(x, y) - 0.95G(x, y)], \quad (8)$$

式中 $B(x, y)$ 、 $G(x, y)$ 是蓝、绿波段的像元的 DN 值。

外推波段的表面反射率较小, 薄云厚度较高, 可以更加精确地估计 HTM。可使用 3×3 像元中值滤波器去除外推波段中的噪声像元。

首先, 使用外推蓝波段代替传感器特定蓝波段, 以提高 HTM 计算的质量。因此, 外推蓝波段用于暗像元搜索, 非重叠窗口大小 ω 对于准确估计 HTM 有重要的作用, $H_{\text{TM}}(x, y)$ 是薄云厚度图的像元值, 通过整幅图像上每个非重叠窗口 ω 中最小的 DN 值确定

$$H_{\text{TM}}(x, y) = \text{MIN}[b_{\text{ext}}(x, y, \omega)], \quad (9)$$

式中 ω 是非重叠窗口的大小。

同样, 选定的暗像元 (窗口大小为 $\omega \times \omega$) 存储在一个大小为 $(n/\omega, m/\omega)$ 的矩阵中, 其中 (n, m) 是原始图像的大小, 该矩阵中值滤波 (3×3 像元) 后使用三次插值调整为原始图像的大小。

其次, 创建薄云掩膜去标记有云区域与无云区域。这种掩膜是基于具有中等大小窗口 ω_2 以及由 $H_{\text{TM}}(\omega_2)$ 计算的均值和均方差值组合的阈值 T_h 生成的, 该中等大小窗口 ω_2 对于薄云区以及无云区的判断有着直接的影响, T_h 是薄云厚度图中像元点的阈值

$$T_h = \overline{H_{\text{TM}}(x, y, \omega_2)} + x \text{STDEV}[H_{\text{TM}}(x, y, \omega_2)], \quad (10)$$

式中 $\overline{H_{\text{TM}}(x, y, \omega_2)}$ 是在窗口大小为 ω_2 时生成的薄云厚度图中所有 DN 值的均值, $\text{STDEV}[H_{\text{TM}}(x, y, \omega_2)]$ 是薄云厚度图中 DN 值的标准差。如果满足条件 $H_{\text{TM}}(x, y, \omega_2) < T_h$, 像元被归类为无云, 否则就被归类为薄云, 默认 $x = 0$ 。当 $x < 0$ 时, 更多的像元被标记为薄云; 当 $x > 0$ 时, 则更少像元被标记为薄云。

1.2 每个波段的HTM

首先计算每个波段临时的 $H'_{TM,i}(x,y)$,并将 $H'_{TM,i}(x,y)$ 与 $H_{TM}(x,y)$ 的比值作为回归系数 k_i 存储在数组 K 中。使用薄云掩膜中标记为薄云的像元计算回归系数。 k_i 的序列应该随着波长增大而减小,即 $k_{i+1} < k_i$,并对数组 K 进行线性缩放至合适的范围内, $H'_{TM,i}(x,y)$ 是每个波段计算所得的临时薄云厚度图, $H'_{TM,i}(x,y)$ 中像元的值由各波段中在每个非重叠窗口 ω_3 中的最小值确定,即

$$H'_{TM,i}(x,y) = \text{MIN}[b_i(x,y,\omega_3)], \quad (11)$$

式中 i 是波段号, $b_i(x,y,\omega_3)$ 是波段 i 的DN值。

非重叠窗口大小 ω_3 对于拟合得到的线性回归系数有着直接的影响, k_i 是斜率:

$$k_i = \text{SLOPE}[H_{TM}(x,y), H'_{TM,i}(x,y)]. \quad (12)$$

最终每个波段特定的 $H_{TM,i}(x,y)$ 为

$$H_{TM,i}(x,y) = H'_{TM,i}(x,y)k_i. \quad (13)$$

1.3 薄云去除

从 $d_{\text{sensor},i}(x,y)$ 中减去 $H_{TM,i}(x,y)$ 可以恢复去薄云的波段:

$$d_i(x,y) = d_{\text{sensor},i}(x,y) - H_{TM,i}(x,y). \quad (14)$$

这种减法通过HTM从图像中移除薄云影响。然而,HTM包括薄云和清晰场景的气溶胶,薄云去除需要保留气溶胶的影响,从而不影响后续的大气校正。因此,需要计算原始图像 $M_{\text{original},i}$ 中晴空区域的平均DN值与校正区域 $M_{\text{dehazed},i}$ 的平均DN值之间的差值,并将该差值加到 $d_i(x,y)$ 中,具体计算公式为

$$d_{\text{final},i}(x,y) = d_i(x,y) + \text{abs}(M_{\text{original},i} - M_{\text{dehazed},i}), \quad (15)$$

式中 $d_{\text{final},i}(x,y)$ 是各波段最终计算所得像元点的DN值, $M_{\text{original},i}$ 、 $M_{\text{dehazed},i}$ 分别是晴空区域与校正区域的平均DN值。

最终将薄云去除后的每个波段重新合成一张薄云去除的多光谱遥感图像。

1.4 参数选择分析

由于非重叠窗口大小对于最终薄云去除结果有着重要的影响,所以对于窗口大小的选择进行了具体分析。另外,非重叠窗口大小应为奇数,便于之后的暗像元搜索。

(1) HTM外推蓝波段非重叠窗口大小的选择

HTM计算的准确性取决于暗像素搜索所采用的光谱带和非重叠窗口的大小。由于外推蓝波段的表面反射率较小,使得薄云的厚度表现得更高,从而可以更精确地估计HTM。HTM的准确估计对于后续计算回归系数 k_i 有着极其重要的影响,而回归系数 k_i 的准确计算又对该算法去除薄云的效果产生直接的重要影响。图1所示的结果其位置为北京市某山区(39.6° N, 116.5° E)。从图中可以看出,当窗口越小时,HTM中薄云的结构反映得越清晰,可以更加准确地估计HTM。当取最小窗口($\omega = 3$)时,HTM对于薄云的形状、厚度以及所分布的区域都能准确反映,因此外推蓝波段的非重叠窗口大小设置选择为3。

(2) 薄云掩膜非重叠窗口大小选择

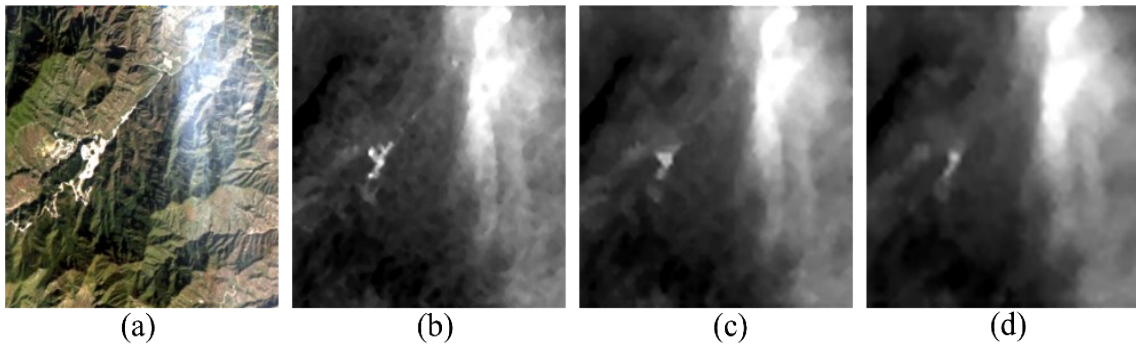


图1 外推蓝波段不同窗口大小形成的HTM。(a)原图;(b) $\omega = 3$; (c) $\omega = 5$; (d) $\omega = 7$

Fig. 1 HTM formed by extrapolating from the blue band with different window sizes.

(a) Original image; (b) $\omega = 3$; (c) $\omega = 5$; (d) $\omega = 7$

利用所生成的薄云掩膜, 通过计算其中像元的均值与标准差, 标记薄云区与无云区像元坐标。其中薄云区像元坐标对于计算各波段的回归系数 k_i 有着直接的影响, 无云区像元坐标对于去除薄云后恢复无云区图像有着重要的作用, 像元坐标的标记为后续大气校正提供了保证。图2所示结果其位置为北京市某郊区 (39.6° N , 116.5° E)。从图中可以看出, 当取较小的中等窗口 ($\omega = 11$) 时, 原图中高亮部分对于所生成的薄云掩膜有较大的干扰; 当取较大的中等窗口 ($\omega = 31$) 时, 所生成的薄云掩膜对于有云区域的形态、云厚度的描述与原图有较明显的差别; 当取适中的中等窗口 ($\omega = 21$) 时, 原图中高亮地物对于所生成的掩膜的影响较小, 并且对于原图中云的结构也有比较准确的描述, 因此薄云掩膜非重叠窗口的大小选择为21。

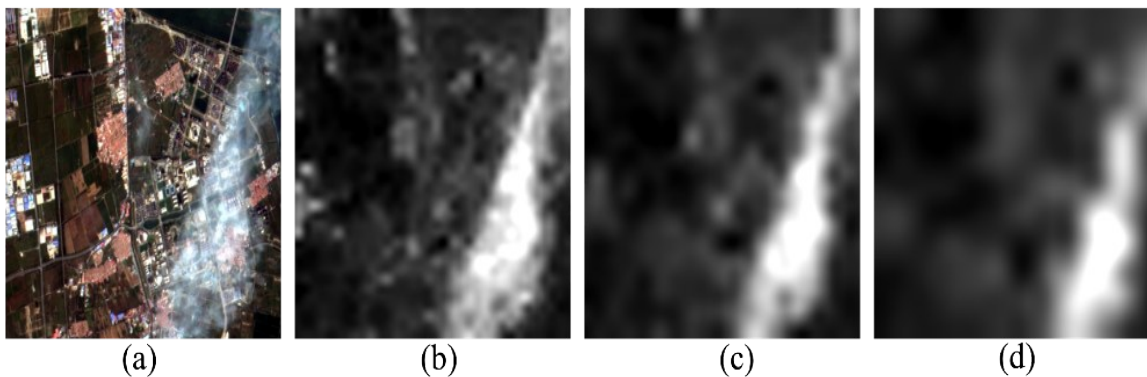


图2 薄云掩膜不同窗口大小的判断结果。(a)原图;(b) $\omega = 11$; (c) $\omega = 21$; (d) $\omega = 31$

Fig. 2 Judgment results of different window sizes for thin cloud masks. (a) Original image; (b) $\omega = 11$; (c) $\omega = 21$; (d) $\omega = 31$

(3) 每个波段HTM_i中非重叠窗口大小的选择

对多光谱图像进行去薄云, 由于薄云厚度在各个波段中表现出的厚度有所不同^[16], 从所有波段中减去一个恒定的薄云厚度值会导致红色波段和近红外波段过度去云以及在去云过程中光谱特性的损失。为了保持光谱一致性, 必须对每个波段减掉该波段相对应的薄云厚度, 计算出每个波段的HTM。每个波段的线性回归系数 k_i 通过外推蓝波段的HTM与各个波段的HTM_i在有云区域的线性回归拟合得出, 因此每个波段HTM_i中非重叠窗口大小的选择显得尤为重要, 不同窗口的大小会直接影响拟合得到的线性回归系数的精确度。图3所示结果位置为印度哈里亚纳邦某山区 (30.7° N , 76.9° E), 从图中小窗口到中等大小窗口对比发现, 选取小窗口时, 去云后图像相较于原图中地物特征失真明显, 并且丧失了原图中山脉的立体感, 变得扁平; 而

由图 3 (d) 可以明显看出, 选取中等大小窗口时, 在能够完全去除薄云的前提下也很好地恢复了原图中无云区以及薄云下的地物信息特征, 与选择小窗口的去薄云图像形成明显的对比, 因此每个波段 HTM_i 中非重叠窗口大小的选择为 21。

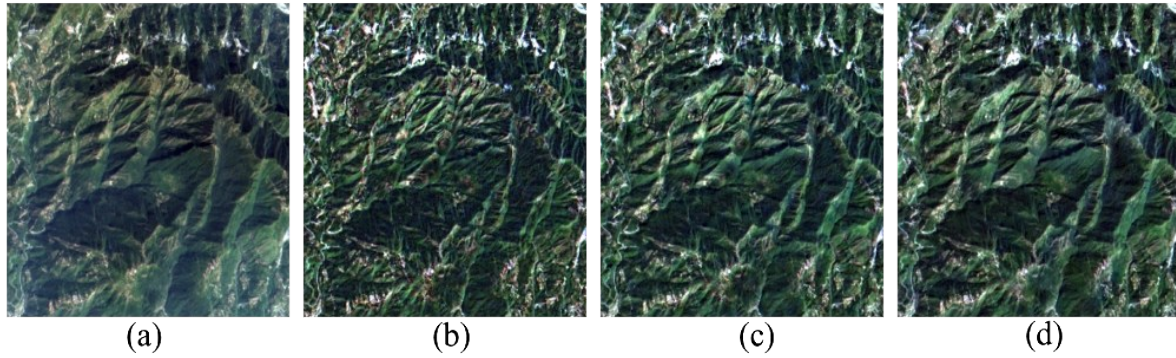


图 3 每个波段不同窗口大小对最终图像的影响。(a) 原图; (b) $\omega = 3$; (c) $\omega = 11$; (d) $\omega = 21$

Fig. 3 Effect of different window sizes on the final image for each band. (a) Original image; (b) $\omega = 3$; (c) $\omega = 11$; (d) $\omega = 21$

2 HJ-2A/B 遥感图像的薄云去除

2.1 数据准备

所采用的数据来自于 HJ-2A 的多光谱相机, 该相机由 4 个 CCD 组成, 4 个 CCD 的光谱辐亮度响应曲线如图 4 所示。

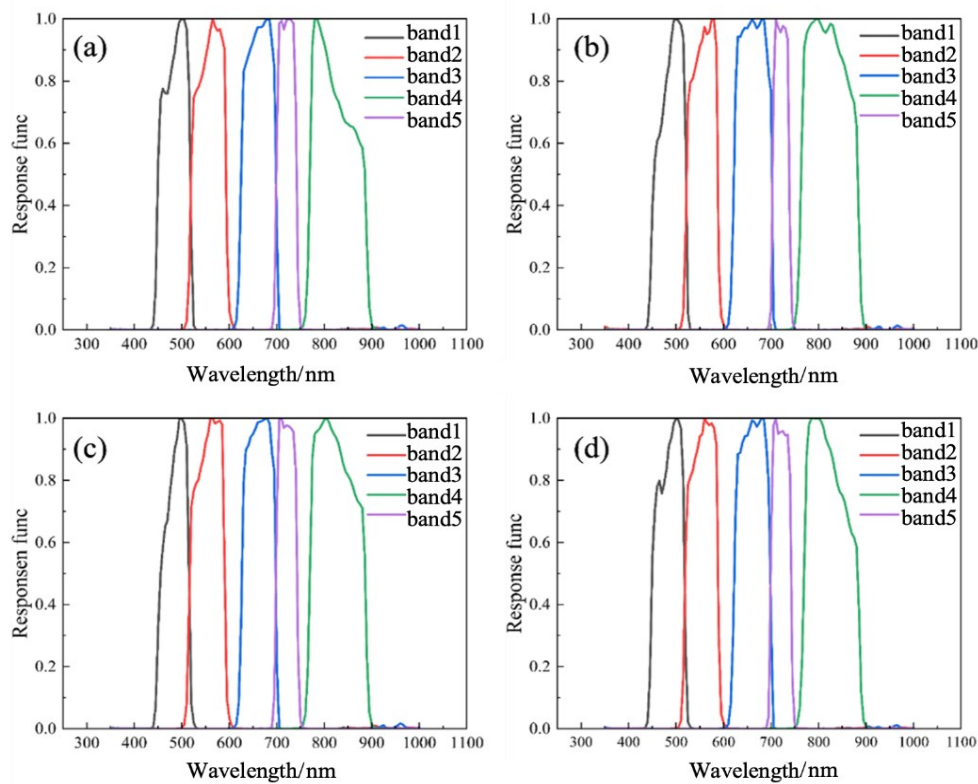


图 4 各 CCD 相机各谱段归一化光谱响应曲线。(a) CCD 1; (b) CCD 2; (c) CCD 3; (d) CCD 4

Fig. 4 Normalized spectral response curves of each spectrum segment for each CCD camera.

(a) CCD 1; (b) CCD 2; (c) CCD 3; (d) CCD 4

可通过表观反射率来判断高亮物体, 表观反射率 ρ_t 的计算公式为

$$\rho_t = \frac{\pi L_t D^2}{E_{\text{SUN}} \cos \theta_0}, \quad (16)$$

式中 π 为常量(球面度, sr), L_t 表示大气层顶进入卫星传感器的光谱辐射亮度[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$], D 为日地之间距离(天文单位), E_{SUN} 表示大气层顶的平均太阳光谱辐照度[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$], θ_0 为太阳天顶角, 其值可以从图像配置的XML文件中读取。

辐亮度 L 的计算公式为

$$L = Ad, \quad (17)$$

式中 A 是增益系数, d 是DN值。

通过计算每个像元的辐亮度 L 求得 L_t , 其中系数 A 在四台CCD相机的参数如表1所示。

表1 不同CCD相机不同波段的辐亮度增益系数A

Table 1 Radiance gain coefficients of different CCD cameras in different wavebands

Camera number	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5
CCD 1	0.050755	0.041790	0.036153	0.041544	0.037851
CCD 2	0.050742	0.041352	0.036395	0.41074	0.038274
CCD 3	0.052859	0.041682	0.036156	0.042267	0.03983
CCD 4	0.052859	0.042426	0.036871	0.042512	0.038774

大气层外太阳辐照度 F_0 的近似计算公式为

$$F_0 = \bar{F}_0 \left(1 + 0.33 \cos \frac{2\pi d_n}{365} \right), \quad (18)$$

式中 \bar{F}_0 是日地平均距离的太阳辐照度, d_n 表示一年中的天数。

2.2 处理流程

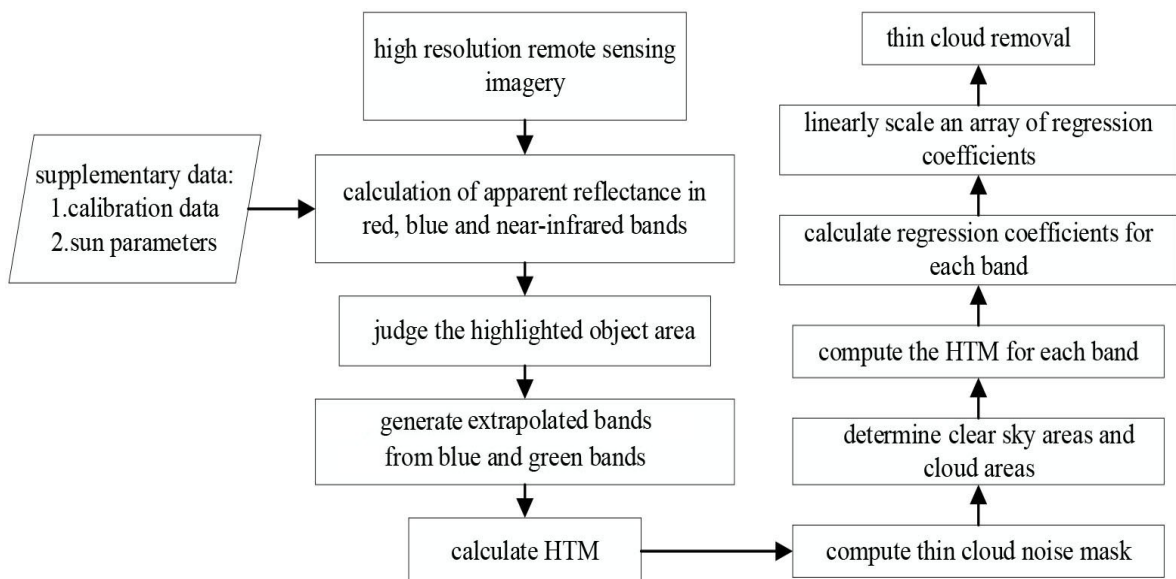


图5 多光谱遥感图像薄云去除技术路线

Fig. 5 Technical route for thin cloud removal in multispectral remote sensing images

图5为多光谱遥感图像薄云去除技术路线。下面给出技术路线中关键步骤的中间结果,所选中间结果对最后薄云去除效果有着重要的影响。

(1) 高亮物体区域

由于高亮物体区域较大的DN值将会导致错误估计HTM,影响最终的去薄云结果,并且可能导致图像被过校正,使得图像严重失真。因此,需要通过表观反射率的计算对高亮区域进行标记,消除其对薄云去除结果的影响。图6为区域A(印度北方邦,参见2.3)中检测到的高亮区域,检测结果与目视判断一致。

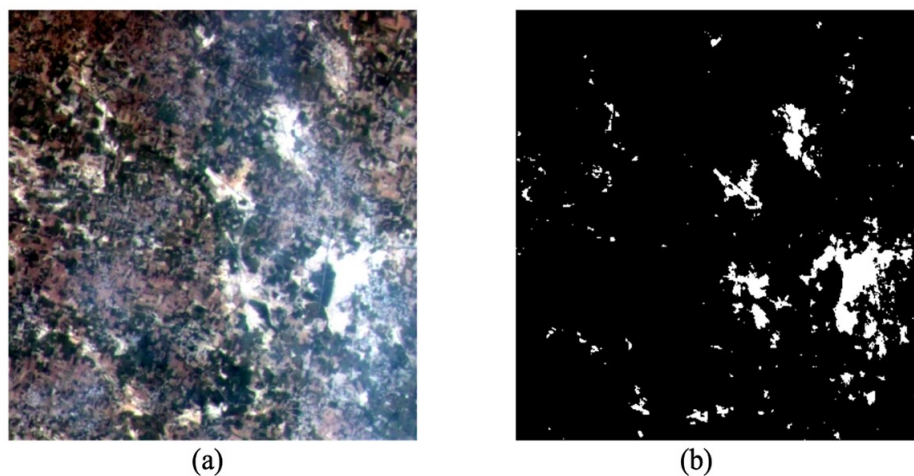


图6 区域A高亮物体区域。(a)原图;(b)高亮地表

Fig. 6 Highlighted object area in area A. (a) Original image; (b) highlighted area

(2) 外推蓝波段HTM计算结果

基于前面的窗口选择分析,对外推蓝波段选择窗口 $\omega = 3$ 的全局暗像元搜索,并通过中值滤波去除图像中噪声。图7为由区域A及其HTM计算结果。

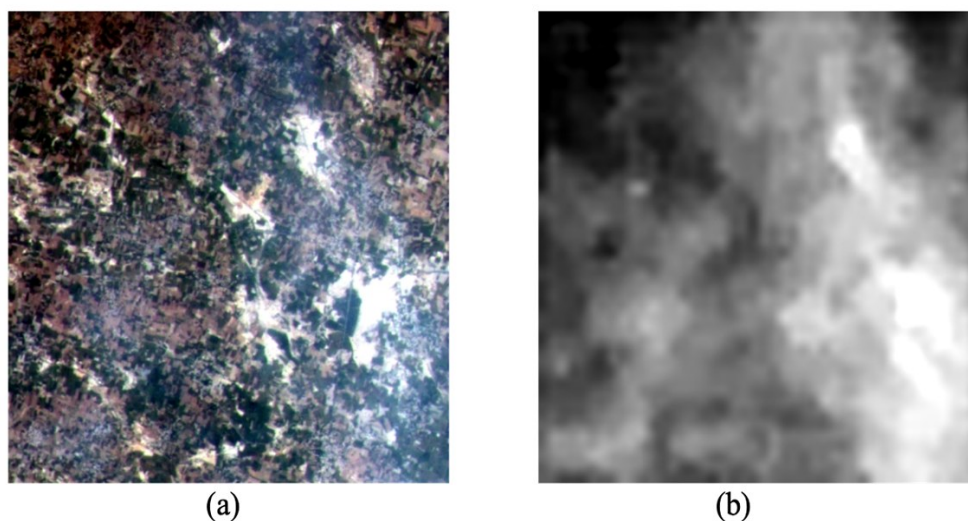


图7 区域A及其HTM图像。(a)原图;(b)HTM图

Fig. 7 Area A and its HTM image. (a) Original image; (b) HTM image

(3) 云掩膜结果

需要标记晴空区与有云区的像元,有云区像元用于计算后续的回归系数,晴空区像元用于后续对于薄云去除后图像的修正,还原薄云去除后清晰的场景。基于前面的窗口选择分析,薄云掩膜窗口大小选择 $\omega = 21$ 的全局暗像元搜索。图8为区域A的晴空区域与有云区域,检测结果与目视结果一致,其中黑色区域代表晴空区,灰色区域代表有云区域。

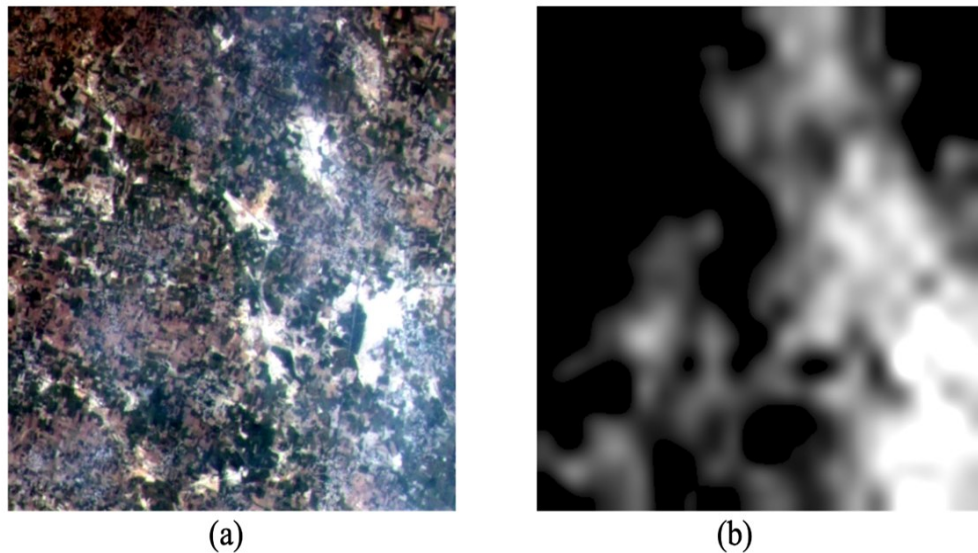


图8 区域A云掩膜图。(a)原图;(b)云掩膜图

Fig. 8 Cloud mask image of area A. (a) Original image; (b) cloud mask image

(4) 各波段 HTM_i 计算结果

基于前面的窗口选择分析,对各个波段选择窗口为 $\omega = 21$ 的全局暗像元搜索,通过中值滤波去除噪声,在有云像元点中各波段 HTM_i 与外推蓝波段 HTM 求得线性回归系数。图9为区域A中各个波段的 HTM_i 计算结果。

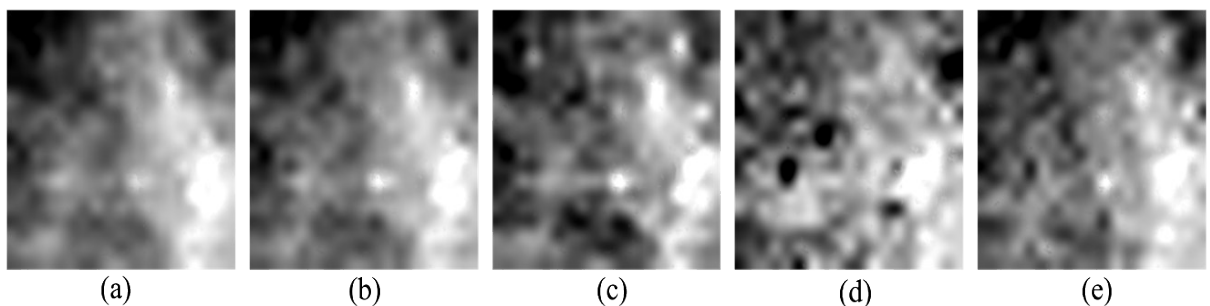


图9 区域A各波段 HTM_i 计算结果。(a)波段1;(b)波段2;(c)波段3;(c)波段4;(e)波段5

Fig. 9 HTM_i calculation results of each band in area A. (a) Band 1; (b) band 2; (c) band 3; (d) band 4; (e) band 5

(5) 各波段线性回归系数

通过对有云像元点中 HTM 与各波段 HTM_i 进行线性拟合,所得拟合方程的斜率即为该波段的线性回归系数。图10为区域A各个波段线性拟合的结果。

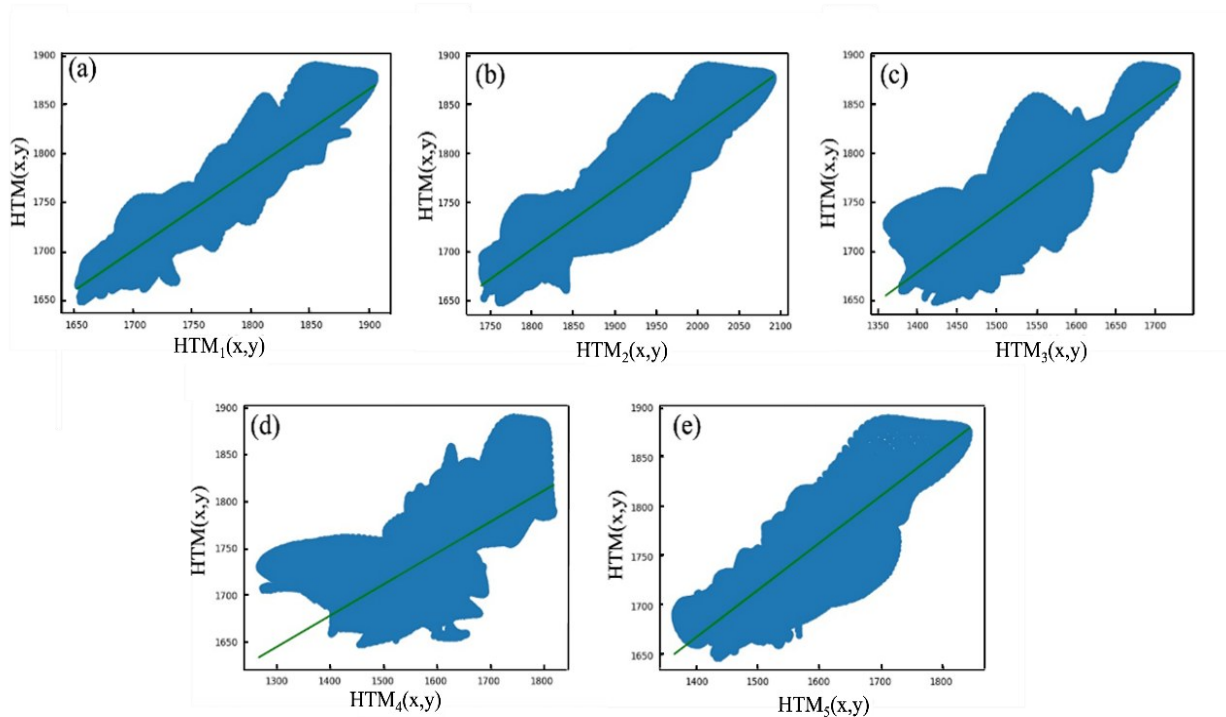


图 10 区域A各波段线性回归系数。(a) 波段 1; (b) 波段 2; (c) 波段 3; (d) 波段 4; (e) 波段 5

Fig. 10 Linear regression coefficient of each band in area A. (a) Band 1; (b) band 2; (c) band 3; (d) band 4; (e) band 5

2.3 薄云去除结果

基于HTM薄云去除算法对HJ-2A的多光谱相机所拍摄的高分辨率遥感图像进行薄云去除,结果如图11所示,其中区域A位于印度北方邦(27° N, 78° E),区域B位于印度查谟和克什米桑巴分区(32.6° N, 75.3° E),区域C位于中国吉林省延边朝鲜族自治州(42.5° N, 129.3° E),区域D位于中国北京市(39.6° N, 116.5° E)。

从图可以看出,基于HTM的薄云去除算法能够有效地识别并去除原始图像的薄云,薄云下不同的地物信息被清晰地展示出来,并且该算法对于植被、城区和山区等地物类型都有比较优秀的去除效果,去除薄云后提高了图像的清晰度,对于图像中的纹理等细节性信息也有比较大的提升。此外,该算法在去除薄云的同时对于无云区域的影响较小,能够很好地保护无云区域的地物信息。由不同区域去除薄云效果可以看出,算法对于地物类型是不敏感的,表明对于不同的地物类型该算法均具有较高的适用性。

3 分析与讨论

为进一步说明薄云去除的效果,对区域A—D的薄云去除前后的图像进行定量化评估。

3.1 清晰度

清晰度能够反映出图像的质量,代表图像中细节以及边缘的清晰程度。本研究采用Laplacian梯度函数的清晰度算法,图像清晰度 $D(f)$ 定义为

$$D(f) = \sum_y \sum_x |G(x,y)|, \tag{19}$$

式中 $G(x,y)$ 为像元点 (x,y) 处Laplacian算子的卷积。Laplacian算子 L 的计算公式为

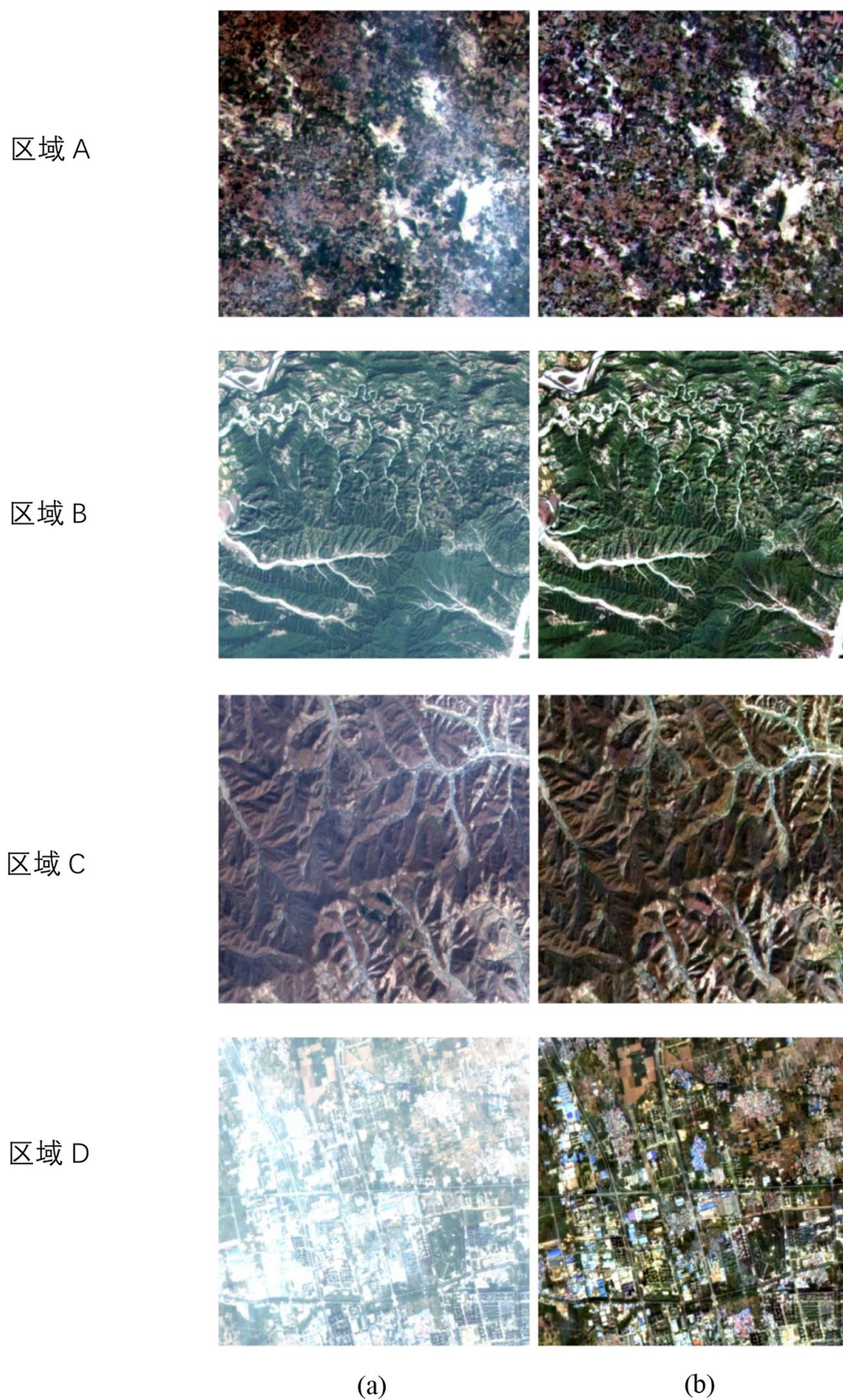


图 11 区域A—D薄云去除前后图像。(a) 原图; (b) 去薄云后图像

Fig. 11 The images for area A—D before and after thin cloud removal. (a) Original images; (b) images after removing thin clouds

$$L = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & -20 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

薄云去除前后图像的清晰度结果如图 12 所示。由图可以看出, 四个区域中 5 个波段薄云去除后的图像清晰度较薄云去除前均有明显的提升, 其中四个区域中的波段 1 平均提升 69.88%, 波段 2 平均提升 33.45%, 波段 3 平均提升 28.22%, 波段 4 平均提升 10.80%, 波段 5 平均提升 13.58%, 因此薄云去除后的图像质量更好, 能够表现出更多的地物信息细节, 符合目视判断结果。

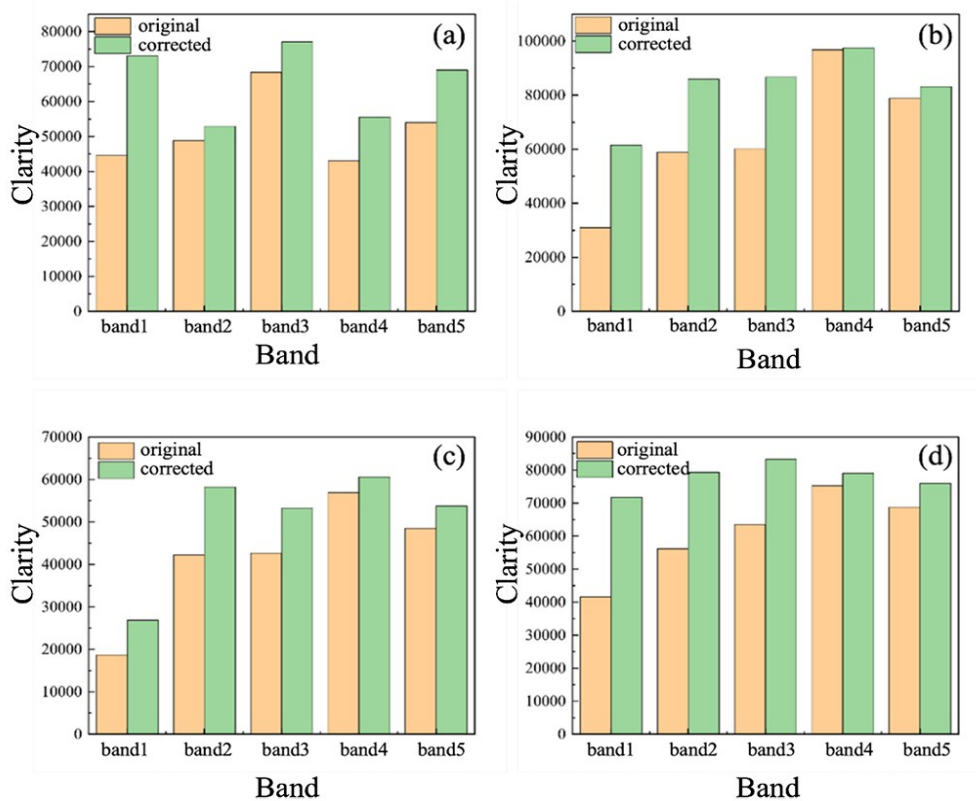


图 12 区域 A—D 薄云去除前后清晰度结果对比。(a) 区域 A; (b) 区域 B; (c) 区域 C; (d) 区域 D

Fig. 12 Comparison of clarity before and after thin cloud removal in area A—D. (a) Area A; (b) area B; (c) area C; (d) area D

3.2 对比度

图像对比度是表示一幅图像中灰度差异值的大小, 能够影响视觉判断的效果。对比度越大, 则图像的颜色对比就会更明显; 反之, 对比度越小, 图像则会模糊不清。图像对比度 C 的计算公式为

$$C = \sum_{\delta} \delta(i,j)^2 P_{\delta}(i,j), \quad (21)$$

式中 $\delta(i,j) = |i-j|$, 为邻近像元间的 DN 值之差, $P_{\delta}(i,j)$ 为 DN 值差为 δ 的概率。

薄云去除前后图像的对比度结果如图 13 所示。由该图可以发现, 四个区域中 5 个波段薄云去除后的图像对比度较薄云去除前均有比较明显的提升, 其中, 波段 1 平均提升 68.68%, 波段 2 平均提升 33.07%, 波段 3 平均提升 28.04%, 波段 4 平均提升 10.66%, 波段 5 平均提升 13.41%。薄云去除后图像对比度增强, 图像的内容就更加清晰, 与目视效果判断一致。

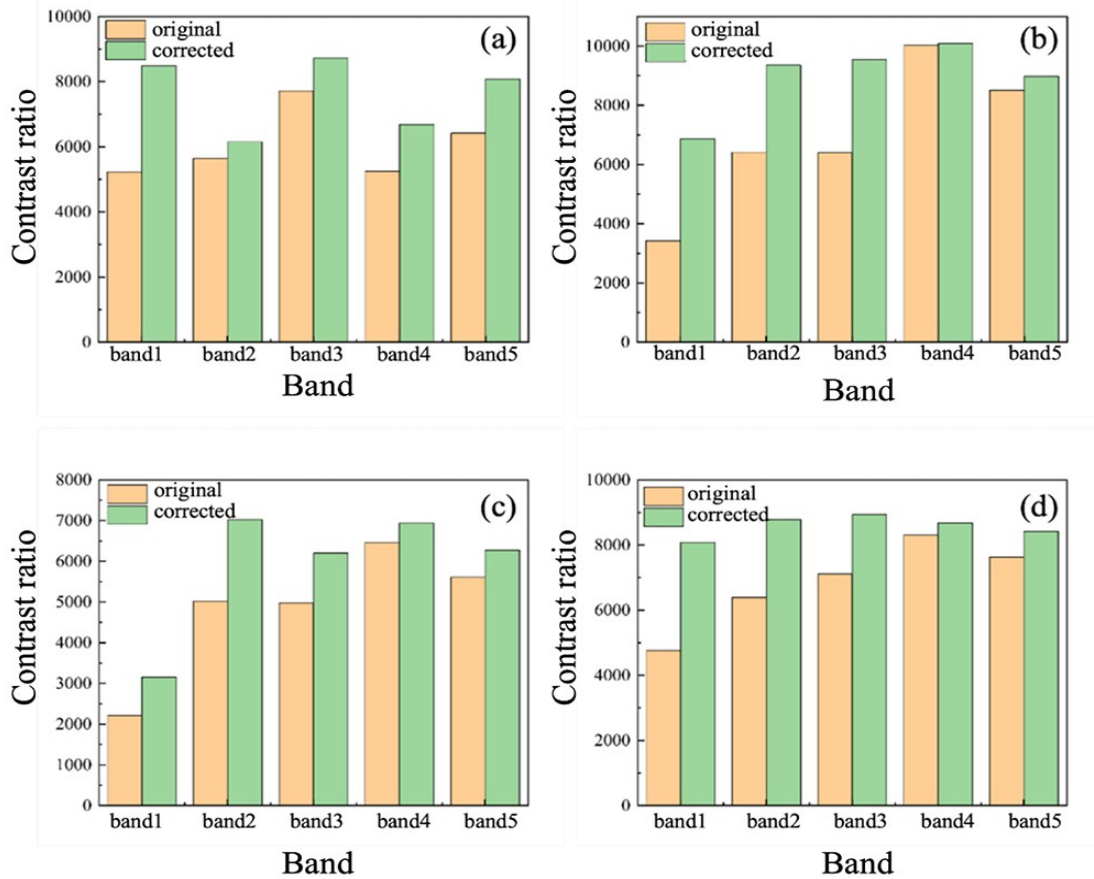


图 13 区域A—D薄云去除前后图像的对比度结果。(a) 区域A; (b) 区域B; (c) 区域C; (d) 区域D

Fig. 13 Comparison of image contrast before and after thin cloud removal in area A-D.

(a) Area A; (b) area B; (c) area C; (d) area D

3.3 标准差

标准差表示图像中每个像元点的DN值与均值的离散大小程度,与图像的细节特征息息相关。若图像标准差较小,则说明图中像元DN值波动范围较小,所能传达的信息就越少。相反,图像的标准差较大,则表示包含的信息也就越丰富。标准差 $S_{id}(x)$ 的计算公式为

$$S_{id}(x) = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (G(X_{i,j}) - \overline{G(x)})^2}, \quad (22)$$

式中 $M \times N$ 为图像尺寸, $G(X_{i,j})$ 表示第*i*行、第*j*列的像素值, $\overline{G(x)}$ 为平均DN值。

四个区域薄云去除前后图像的标准差结果如图14所示。由该图可以发现,四个区域中5个波段薄云去除后图像标准差较薄云去除前的图像标准差均有比较明显的提升,其中,波段1平均提升30.31%,波段2平均提升12.52%,波段3平均提升12.11%,波段4平均提升5.14%,波段5平均提升7.28%。薄云去除后图像标准差变大,图像包含更多的细节信息,更能反映图像的细节特征,符合目视效果的判断。

3.4 无云区DN值频率直方图对比

选择区域A中无云区域对该薄云去除算法对无云区域的影响进行验证。验证区域选择为图15中的红色方框区域(包含 100×100 个像元点),对该区域进行DN值频率分布直方图的对比,对比结果如图16所示。

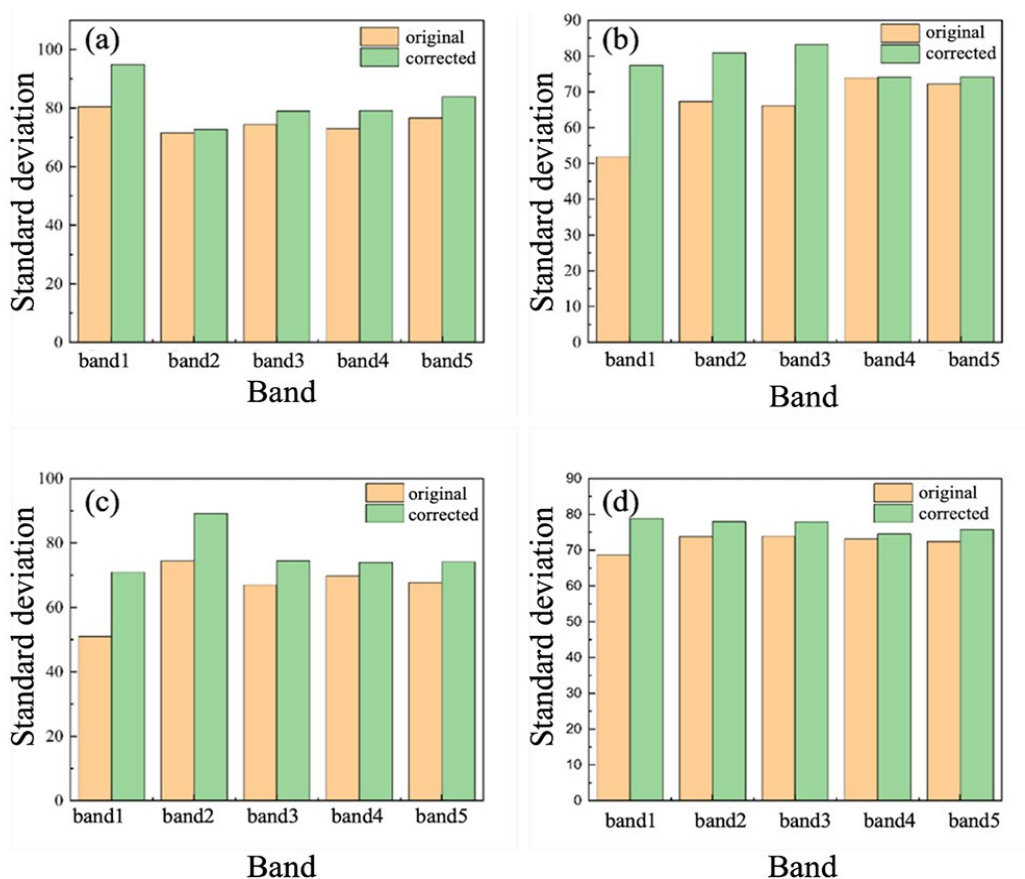


图 14 区域 A-D 薄云去除前后图像标准差对比。(a) 区域 A; (b) 区域 B; (c) 区域 C; (d) 区域 D

Fig. 14 Comparison of image standard deviation before and after thin cloud removal in area A-D.

(a) Area A; (b) area B; (c) area C; (d) area D

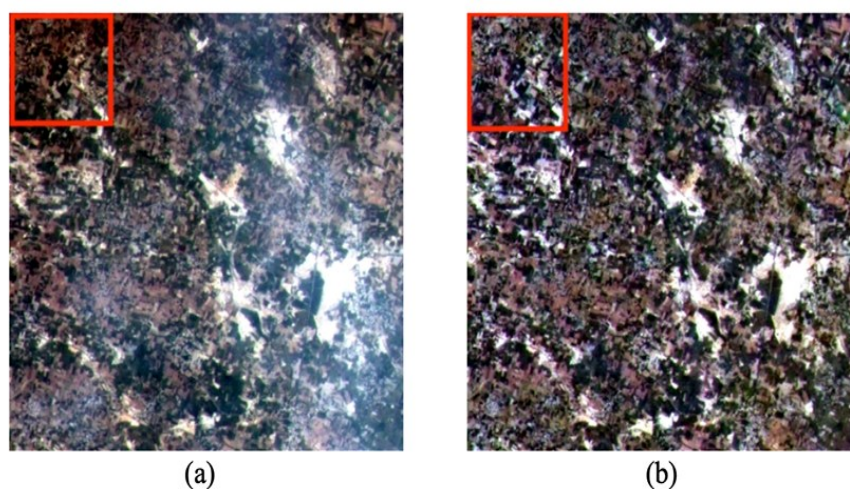


图 15 区域 A 薄云去除前后无云区直方图区域选择。(a) 原图; (b) 去薄云后

Fig. 15 Histogram area selection of cloud-free area before and after thin cloud removal in area A.

(a) Original image; (b) after thin cloud removal

通过对区域 A 所选无云区域进行直方图对比可以发现, 无云区域薄云去除前后 5 个波段均无较明显差别, 说明薄云去除后无云区 DN 值分布与原图相似, 从而可以得出该算法并不影响无云区域的图像质量。

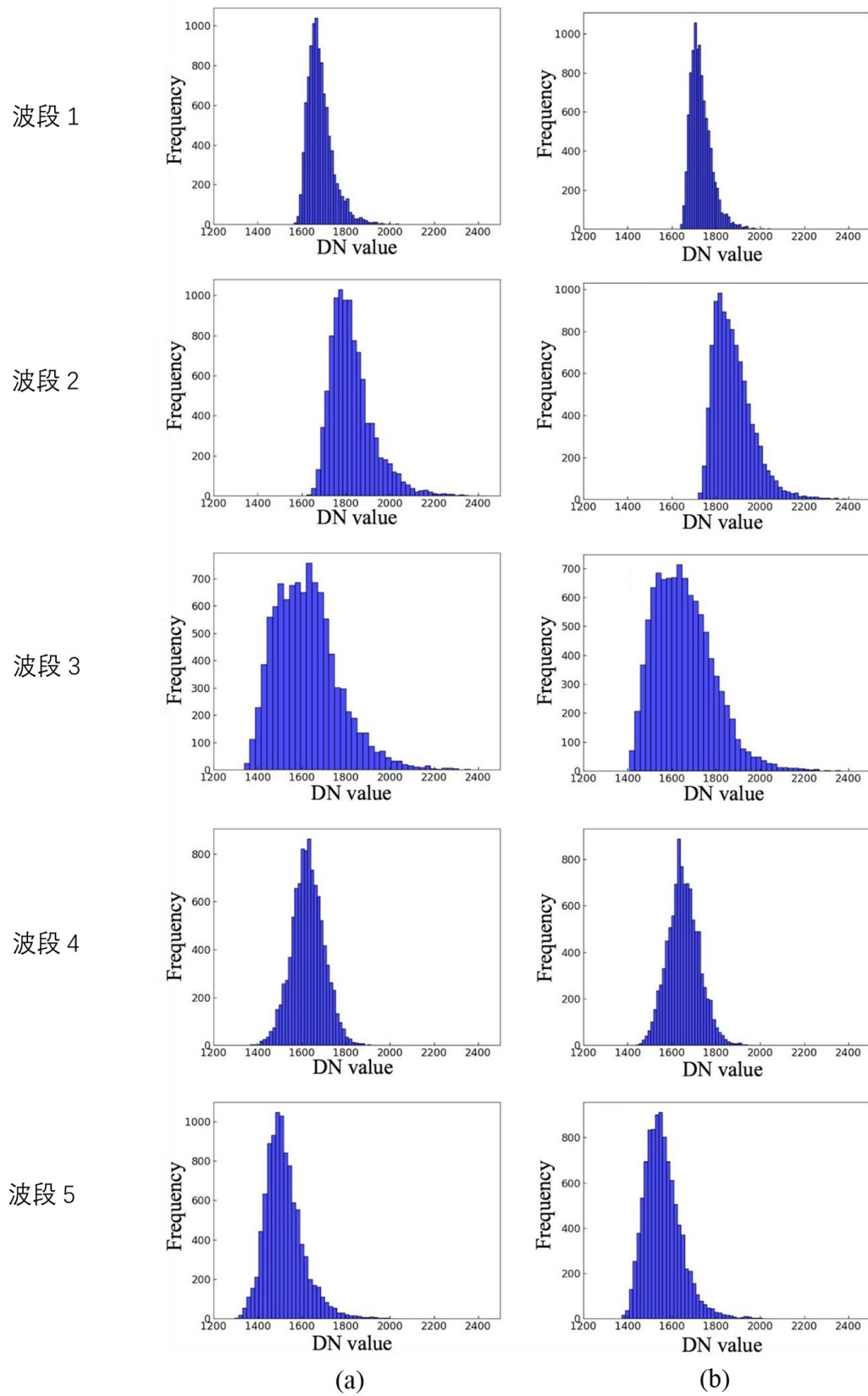


图 16 区域A薄云去除前后各波段无云区直方图结果。(a) 原图; (b) 去薄云后

Fig. 16 The histogram results of the cloud-free area for different bands before and after thin cloud removal in area A.

(a) Original images; (b) after removing thin clouds

4 结 论

基于HTM的薄云去除算法,利用HJ-2A多光谱遥感影像数据计算薄云掩膜图,对有薄云遮挡的环境星遥感图像进行薄云去除。通过薄云去除前后图像的目视对比,该算法能够有效去除有云区域的薄云,恢复薄云覆盖的地物信息,并且对于不同地物类型(如植被、城市区和山区等)均有较强的适应性,图像的质量明显提高。同时,通过对无云区域薄云去除前后图像目视对比和直方图对比,说明该算法基本不影响无云区域的图像质量和灰度值分布。

对薄云去除前后的图像进行了参数指标的评定,通过清晰度、对比度和标准差三个指标来反映该算法的薄云去除的效果,图像中的每一个波段在这三个指标上都表现出比较明显的提升,清晰度、对比度和标准差对于各个波段提升比例分别为10.80%~69.88%、10.66%~68.68%和5.14%~30.31%的范围内,均表明图像质量得到明显提升。

综上,通过对实验结果的目视对比以及指标评定,证明了本研究开发的针对多光谱图像的薄云检测与去除算法能够有效去除遥感图像的薄云并完整保留无云区域信息,有效提升图像质量,提高图像利用率,为后续的遥感应用提供数据保障。

参考文献:

- [1] Ju J, Roy D P. The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 1196-1211.
- [2] Wang Z M. *Thin Cloud Removal of Remote Sensing Images Based on Generation Adversarial Network* [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2019.
王征明. 基于对抗生成网络的遥感图像薄云去除算法的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [3] Liu C Y. *Research for Remote Sensing Image Atmospheric Correction Method Based on Ground Surface Spectrum Vector Space* [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010.
刘成玉. 基于地物光谱矢量空间的遥感图像大气校正方法研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [4] Du Y, Guindon B, Cihlar J. Haze detection and removal in high resolution satellite image with wavelet analysis [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(1): 210-217.
- [5] Liu Z K, Hunt B R. A new approach to removing cloud cover from satellite imagery [J]. *Computer Vision, Graphics, And Image Processing*, 1984, 25(2): 252-256.
- [6] Zhang Y, Guindon B, Cihlar J. An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2/3): 173-187.
- [7] Lv H, Wang Y, Shen Y. An empirical and radiative transfer model based algorithm to remove thin clouds in visible bands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 183-195.
- [8] Shen Y, Wang Y, Lv H, et al. Removal of thin clouds in Landsat-8 OLI data with independent component analysis [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 11481-11500.
- [9] Kauth R J, Thomas G S. The tasselled cap—A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat [C]. *Proceedings, Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, June 29–July 1, 1976,

- Purdue University*, West Lafayette, Indiana. 1976, 159: 41-45.
- [10] Makarau A, Richter R, Müller R, *et al.* Haze detection and removal in remotely sensed multispectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5895-5905.
- [11] Ma L, Bai Z G, Dong J, *et al.* Imaging model design and effectiveness evaluation of HJ-2A/B satellites [J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, 31(3): 34-41.
马磊, 白照广, 董筠, 等. 环境减灾二号 A/B 卫星成像模式设计与效能评价 [J]. 航天器工程, 2022, 31(3): 34-41.
- [12] Lyu Q F, Ren H P, Jin L F, *et al.* Design and certification of HJ-2A/B satellite 16m camera [J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, 31(3): 49-54.
吕秋峰, 任海培, 靳利锋, 等. 环境减灾二号 A/B 卫星 16 m 相机设计与验证 [J]. 航天器工程, 2022, 31(3): 49-54.
- [13] Li C W, Deng X P, Zhao H C. Thin cloud removal algorithm based on wavelet analysis for remote sensing images [J]. *Digital Technology & Application*, 2017, (6): 137-139.
李超炜, 邓新蒲, 赵昊宸. 基于小波分析的遥感影像薄云去除算法研究 [J]. 数字技术与应用, 2017, (6): 137-139.
- [14] Chavez Jr P S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data [J]. *Remote sensing of environment*, 1988, 24(3): 459-479.
- [15] Richter R, Schläpfer D. Atmospheric and topographic correction (ATCOR theoretical background document) [Z/OL]. (2021-03-02)[2022-10-21]. https://www.rese-apps.com/pdf/atcor_atbd.pdf.
- [16] Hu G S, Zha H M, Liang D, *et al.* Ground object information recovery for thin cloud contaminated remote sensing images by combining classification with transfer learning [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(12): 2855-2862.
胡根生, 查慧敏, 梁栋, 等. 结合分类与迁移学习的薄云覆盖遥感图像地物信息恢复 [J]. 电子学报, 2017, 45(12): 2855-2862.