DOI: 10.11929/j.swfu.201903118

引文格式: 李尚洁, 李明诗, 沈文娟. 多时相 Landsat 遥感影像相对辐射归一化方法的性能比较 [J]. 西南林业大学学报(自然 科学), 2019, 39(3): 109–116.

多时相 Landsat 遥感影像相对辐射归一化方法的性能比较

李尚洁1 李明诗1,2 沈文娟1,2

(1. 南京林业大学林学院, 江苏南京 210037; 2. 南方林业协同创新中心, 南京林业大学, 江苏南京 210037)

摘要:多时相遥感影像的辐射归一化操作是进行土地覆盖变化检测和图像拼接之前不可缺少的步骤,本研究基于2013年7月10日和2016年3月28日覆盖南京的Landsat8OLI数据,以2016年影像作为参考影像,采用基于分布的直方图匹配法和顺序转换法,与基于像元的多元变化检测法和随机森林法对影像实施相对辐射归一化操作。采用信息熵、边缘强度、空间频率、峰值信噪比、交互信息量5个客观评价指标对不同相对辐射归一化方法的性能进行了评价。结果表明:4种归一化方法处理后通过目视能看出影像空间信息保留很完整,没有破坏地物的光谱特征,再结合5个评价分析比较得出顺序转化法的归一化效果最优。研究结论可为多时相遥感影像的协同利用提供参考。

关键词:多时相遥感;辐射归一化;直方图匹配法;顺序转化法;多元变化检测法;随机森 林归一化法

中图分类号: TP75; S771.8 文献标志码: A 文章编号: 2095-1914(2019)03-0109-08

Performance Comparison of Multi-temporal Landsat Remote Sensing Image Relative Radiation Normalization Method

Li Shangjie¹, Li Mingshi^{1,2}, Shen Wenjuan^{1,2}

(1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu 210037, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu 210037, China)

Abstract: The radiation normalization operation of multi-temporal remote sensing images is an indispensable step before land cover change detection and image stitching. This study was based on the Landsat 8 OLI data covering Nanjing on July 10, 2013 and March 28, 2016, with 2016 images as reference images. The distribution-based histogram matching method and sequential conversion method were used to perform relative radiation normalization operation on images based on pixel-based multivariate change detection method and random forest method. The performance of different relative radiation normalization methods was evaluated by using 5 objective evaluation indexes: information entropy, edge intensity, spatial frequency, peak signal-to-noise ratio and interactive information. The results show that after 4 kinds of normalization methods, it can be seen through visual observation that the image spatial information remains intact and there is no spectral feature of the damaged features. Combined with 5 evaluations and comparisons, it is concluded that the normalization effect of the sequential transformation method is optimal. The research conclusions can provide reference for the collaborative use of multi-temporal remote sensing images.

Key words: multi-temporal remote sensing; radiation normalization; histogram matching; ordinal conversion; multivariate change detection; random forest normalization

通信作者:李明诗(1973—),博士,教授,博士生导师。研究方向:遥感、GIS及生态应用。Email:nfulms@njfu.edu.cn。

收稿日期:2018-10-11;修回日期:2019-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(31670552)资助;江苏省青蓝工程项目资助。

第1作者:李尚洁(1995—),硕士研究生。研究方向:森林经理学遥感与GIS应用。Email: lishangjie2018@163.com。

在利用多时相遥感影像进行图像拼接、镶嵌 之前,为了减少由于太阳照度几何、大气状态以 及传感器性能等方面的差异造成的影像同一地物 的辐射差异,通常会对影像进行辐射归一化操 作[1]。目前辐射归一化处理主要有2类方法:绝 对辐射归一化和相对辐射归一化。绝对辐射归一 化是将每个影像像元的灰度值转换为地表反射 率,在转换过程中需要用到大量的卫星同步观测 数据和实时大气属性数据来进行大气辐射传输精 确模拟从而实现大气校正和传感器校正,反演获 得地表反射率数据[2]。然而,实践中获取这样的 数据通常是困难、昂贵且不切实际的(如针对久 远的历史遥感观测数据)。相对辐射归一化避免 了将影像的灰度值转换成地表反射率的复杂计 算, 它只需要选定一幅影像作为参考影像, 然后 将其他时间或者传感器获取影像的灰度值逐波段 归一化到与参考影像具有相同的辐射一致性^[3]。

目前,相对辐射归一化的方法很多,如胡昌 苗等^[4]在对全球范围进行自动相对辐射处理时, 基于伪不变特征的 IR-MAD 算法可以应用到全球 的遥感数据大气校正中。Xu 等^[5]基于 ALOS 影像 数据比较了 3 种相对辐射归一化方法对于辅助森 林属性估算精度的影响,结果表明 3 种方法都提 高了样地水平的森林材积估算精度。余晓敏等^[3] 提出了基于像元对的和基于分布的相对辐射归一 化方法。目前基于像元对的相对辐射归一化方法^[6] 包括: 伪不变特征法^[7]、自动控制散点回归法^[8]、 时不变点群法^[2]、多元变化检测法^[9]、迭代加权最 小二乘法^[10]、随机森林归一化法^[11]。基于分布的 相对辐射归一化法^[12]包括:最大-最小值归一化 法、平均值-标准差归一化法^[13]、直方图匹配法^[14]、 顺序转换法^[15]。在应用多时相遥感影像时,针对 不同的数据源、遥感影像的分辨率,准确地选择 合适的归一化方法可以在利用遥感影像进行变化 检测^[16]和图像拼接^[17]之前更快速、更高效地完成 辐射归一化操作。为此,本研究基于 2013 年 7 月 10 日和 2016 年 3 月 28 日 Landsat8 OLI 数据,采 用直方图匹配法、顺序转换法、多元变化检测法 以及随机森林归一化法进行不同时相遥感数据的 归一化操作,在此基础上借助 5 个客观定量评价 指标对上述 4 种归一化方法的性能进行评价,为 遥感实践中恰当方法的选择提供参考。

1 数据来源

研究区为受云影响较小的长江沿岸及南京主 城区(图1)。本研究中选用的影像数据为 Landsat8 OLI影像,该数据可从 USGSEROS 数据中心 (https://glovis.usgs.gov/)免费下载。为了评价4种 辐射归一化方法的性能,本研究选用了在获取时 间和季节均存在明显差异的2期影像数据。以 2016年影像作为参考影像(采集时间为2016年 3月28日),2013年影像作为实验影像(采集时 间为2013年7月10日),所用影像数据详细信 息见表1。



a 实验影像

b 参考影像

颜色模式: R: band5, G: band4, B: band3。

图 1 实验区 Landsat8 OLI 影像 Fig. 1 Landsat 8 OLI images of the study area

表1 研究区遥感数据描述

Table 1 Description of remote sensing data used in this study

| 影像 | 获取日期 | 卫星 | 轨道号 | 云量/% | 传感器 | 数据来源 | 空间分辨率/m |
|------|------------|-----------|---------|------|-----|------|---------|
| 实验影像 | 2013-07-10 | Landsat 8 | 120/038 | 4.18 | OLI | USGS | 30 |
| 参考影像 | 2016-03-28 | Landsat 8 | 120/038 | 0.66 | OLI | USGS | 30 |

2 研究方法

2.1 遥感影像相对辐射归一化方法

2.1.1 直方图匹配法

直方图匹配法是将实验影像的直方图以参考 影像的直方图为标准作变换,使得2幅影像具有 类似的色调和反差。具体方法为:先对实验影像 的直方图进行均衡化处理以获得中间直方图,然 后对其进行修改以匹配参考影像直方图,这样使 得实验影像的直方图分布近似于参考影像的直方 图分布,从而能够消除2幅影像因不同的太阳光 照和大气条件造成的辐射差异。本研究中,直方 图匹配法在 ENVI 中直接执行。

2.1.2 顺序转化法

顺序转化法是由 Nelson 等[15] 在 2005 年提出

的一种归一化方法,这种方法可以用于辐射归一 化和变化检测。该方法不需要将每个影像的灰度 值直接转换为地表反射率值,并且不需要参考影 像,它将影像的灰度值转化为序号值。

本研究中使用顺序转化法对 2013 年的影像进行归一化处理,主要步骤见图 2。3 个步骤包括: 1)提取多时相遥感影像的像元灰度值;2)将提取的像元灰度值按升序排列;3)基于每一个像元 灰度值的大小运用排序算法给每个像元重新赋 值。当多时相遥感影像的所有像元灰度值都转换 为顺序值后,多时相影像像元值的整体分布特征 就能得到较好地匹配^[18]。快速排序算法可以获得 较好的性能,本研究应用 C++中 STL 库的 sort 函 数进行排序运算。

| 提取 | 影像的像元 | 灰度值 | 以 | 升序方式排列 | IJ | 分配顺序排列 | | | |
|----|-------|-----|---|--------|-----|--------|----|-----|-----|
| 像元 | 位置 | 像元值 | 像 | 元位置 | 像元值 | 像元伯 | 立置 | 像元值 | 排序值 |
| х | Y | | Х | Y | | Х | Y | | |
| 1 | 1 | 8 | 1 | 5 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 5 | 1 | 3 | 4 | 1 | 3 | 4 | 2 |
| 1 | 3 | 4 | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 5 | 2.5 |
| 1 | 4 | 5 | 1 | 4 | 5 | 1 | 4 | 5 | 2.5 |
| 1 | 5 | 1 | 1 | 1 | 8 | 1 | 1 | 8 | 5 |
| | | | | | | | | | |
| N | п | # | Ν | n | # | N | n | # | |

图 2 顺序转化法的示例

Fig. 2 Illustration of the ordinal conversion method

2.1.3 多元变化检测法

多元变化检测算法是由 Canty 等^[9] 在 2004 年 提出的一种归一化方法。该方法基于多元变化检 测的线性尺度不变性,获取多时相影像中稳定不 变的像元;然后,基于这些像元采用正交回归法 计算实验影像与参考影像各波段的回归方程,并 用该回归方程对多时相影像逐波段地进行相对辐 射归一化^[3]。

2.1.4 随机森林法

基于随机森林的归一化法是 Seo 等^[11]提出

的。该方法通过获得研究区无变化区域,通过随 机森林进行建模,进而得到归一化影像。本研究 选用实验影像和参考影像的近红外波段之间的散 点图识别不变像元^[19],得到无变化区域后,利用 ENVI 获取每个不变像元值与提取对应位置上的 若干变量来构建随机森林回归模型^[20],本研究中 所用到的变量见表 2。然后,用 R 语言中的随机 森林包建立像元值与变量之间的随机森林模型, 将所获得的解释变量作为之前获得的随机森林模 型的输入值。最后,获得预测值得到归一化的影像。

| 变量类型 | 变量 |
|--|-------------------------------|
| 波段 | Band2 ~ 7 |
| 纹理特征 | Band2、Band3、Band4的5×5像素邻域的均值、 |
| 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 | 角二阶矩、熵、相关性、万差、对比度 坡度。坡向 |

2.2 相对辐射归一化性能评价

本研究共选定了信息熵、边缘强度、空间频率、 峰值信噪比以及交互信息量5个测度,依次从影像 信息损失度方面来评价各个方法的归一化效果。

1)信息熵。信息熵的大小反映了图像携带的 信息量的多少。影像的信息熵越大,其信息量就 越丰富,质量也就越好^[21]。将归一化结果的各个 波段与参考影像的信息熵进行比较,两者相差越 小说明对应校正结果信息损失越少,即说明对应 的校正方法越好。

2)边缘强度。图像边缘是指其周围像元灰度 有阶跃变化的那些像元的集合。沿边缘的法线方 向图像局部变化强度的量度便是边缘强度^[22]。

3)空间频率。空间频率是图像函数在单位长 度上重复变化的次数。它反映了一幅图像空间的 总体活跃程度,包括空间行频率和空间列频率。

4)峰值信噪比。峰值信噪比(PSNR)是一 个信号的最大功率与可能影响它的表示精度的噪 声功率的比值^[23]。PSNR是衡量图像失真或是噪 声水平的客观标准。2个图像之间 PSNR 值越大, 则越相似。

5)交互信息量。2个随机变量的互信息(MI) 或转移信息是变量间相互依赖性的度量^[24]。交互 信息量的值越大,表示归一化影像从参考影像中 获取的信息越丰富,归一化效果越好。

3 结果与分析

3.1 归一化影像结果目视分析

本研究使用 4 种方法对 2 期影像进行相对辐射归一化操作,得到各波段的归一化结果,以第 4 波段为例进行归一化结果展示,见图 3。从目视效果看,经过相对辐射归一化处理后,得到的归 一化影像均与参考影像接近,归一化后的影像空 间信息保留很完整,没有破坏地物的光谱特征, 使实验影像与参考影像中相同地物之间光谱值的 差异减少。主要的土地覆盖类型没有发生几何变 形和重影,有着丰富的纹理信息,能清晰分辨城 市建筑、森林、湖泊等地物边缘,且不变区域影 像灰度值均得以增强(例如城市建筑区域)。

3.2 归一化影像结果定量评价

目视分析法是简单、直接的评价方法,但由 于主观性比较强,不能得出客观的评价。因此还 需要从影像信息损失方面来评价各个方法的归一 化效果。本研究选用信息熵、边缘强度、空间频 率、峰值信噪比、交互信息量 5 个指标,利用 MATLAB 编程实现各项指标的计算,得到各种归 一化方法的定量评价结果,见表 3~7。

经过4种归一化方法处理后的影像信息熵见 表3。由表3可知,计算归一化影像与参考影像 的信息熵差值平均值从小到大依次是:顺序转换 法(0.1581)>随机森林归一化法(0.1916)>多 元变化检测法(0.2278)>直方图匹配法(0.2515); 实验影像使用4种归一化方法进行处理后,得到 归一化影像的信息熵均有损失,4种归一化结果 与参考影像的信息熵差值差异不是很大,验证了 在目视分析时提到的光谱信息保留完整。但实验 影像经过顺序转换法处理的差值更小,该方法使 得归一化影像信息损失更少,校正效果更好。

经过4种归一化方法处理后的影像边缘强度 见表4。由表4可知,边缘强度平均值从大到小 依次是:多元变化检测法(182.1216)>顺序转换 法(180.9242)>随机森林归一化法(166.4395)> 直方图匹配法(160.2348)。边缘强度在实验影 像经过归一化处理后均得到了提升,归一化影像 的细节特征都得以增强。在保留影像信息的同时 边缘强度增加使得图像清晰度提高,其中多元变 化检测法在边缘强度方面有较大的提升,说明经 过该归一化方法处理后的影像边缘信息更富丰,物体更容易识别。

经过4种归一化方法处理后的影像空间频率 见表5。由表5可知,空间频率在实验影像经过 归一化处理后均得到了提升,空间频率平均值从 大到小依次是:顺序转换法(49.3771)>多元变 化检测法(49.3731)>直方图匹配法(46.6641)> 随机森林归一化法(42.7001)。另外归一化影像 亮度值和空间频率增大,提高了影像细节方面效 果,其空间频率越大,图像的活跃度也会越高, 相应得到的归一化影像也就会越清晰。

经过4种归一化方法处理后的影像峰值信噪 比见表6。由表6可知,峰值信噪比平均值从大 到小依次是:顺序转换法(12.0676)>多元变化 检测法(11.7739)>随机森林归一化法(11.7983)> 直方图匹配法(11.6211)。表明顺序转换法均优

表 2 随机森林模型构建所用变量 Table 2 Variables used in random forest model construction

于其他3种方法,这可能是因为实验影像经过顺 序转换法处理后,归一化影像与参考影像之间的 信号误差更小,会更加清晰,颜色更加饱和,更

能突出不变区域地物类型,在应用到土地覆盖变 化检测时能更好地消除实验影像与参考影像之间 的伪变化。



a 实验影像

b 参考影像



c 直方图匹配结果

d 顺序转换结果



e 多元变化检测结果

f随机森林归一化结果

图 3 第 4 波段归一化结果图像 Fig. 3 Normalized result image of the band 4

经过4种归一化方法处理后的影像交互信息 量见表 7。由表 7 可知, 交互信息量平均值从大 测法(0.389 3)>随机森林归一化法(0.386 3)>

到小依次是:顺序转换法(0.3949)>多元变化检

直方图匹配法(0.3853)。表明经过顺序转换法 处理后的归一化影像获取的信息量更加丰富,交 互信息量也比较高,在今后做土地覆盖利用变化 提取地物信息会更加准确。

114

表 3 各种归一化方法的信息熵评价值

Table 3 The entropy estimates calculated from diverse normalization methods

| 方法 | Band2 | Band3 | Band4 | Band5 | Band6 | Band7 | 平均差值 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 直方图匹配法 | 7.484 9 | 7.513 8 | 7.534 3 | 7.652 7 | 7.573 2 | 7.662 3 | 0.251 5 |
| 顺序转换法 | 7.570 6 | 7.602 5 | 7.625 5 | 7.753 7 | 7.711 3 | 7.717 9 | 0.158 1 |
| 多元变化检测法 | 7.503 6 | 7.553 2 | 7.564 2 | 7.695 4 | 7.602 5 | 7.644 1 | 0.227 8 |
| 随机森林归一化法 | 7.527 3 | 7.574 3 | 7.583 5 | 7.745 5 | 7.675 3 | 7.674 9 | 0.191 6 |
| 参考影像 | 7.676 6 | 7.723 7 | 7.795 3 | 7.987 3 | 7.853 5 | 7.893 7 | _ |

表 4 各种归一化方法的边缘强度评价值

Table 4 The edge intensity estimates calculated from diverse normalization methods

| 方法 | Band2 | Band3 | Band4 | Band5 | Band6 | Band7 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 直方图匹配法 | 121.535 7 | 155.125 7 | 175.123 5 | 170.123 4 | 171.365 3 | 168.135 2 |
| 顺序转换法 | 165.354 9 | 189.255 7 | 202.234 2 | 171.326 4 | 171.658 4 | 185.823 5 |
| 多元变化检测法 | 166.323 6 | 190.545 7 | 202.635 4 | 173.625 6 | 172.362 5 | 187.236 8 |
| 随机森林归一化法 | 157.368 4 | 152.597 6 | 157.656 9 | 172.157 9 | 170.486 2 | 188.369 7 |
| 参考影像 | 114.321 6 | 132.964 2 | 146.134 6 | 169.968 0 | 155.169 8 | 149.598 1 |

表 5 各种归一化方法的空间频率评价值

Table 5 The image space frequency estimates calculated from diverse normalization methods

| 方法 | Band2 | Band3 | Band4 | Band5 | Band6 | Band7 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 直方图匹配法 | 41.723 1 | 48.425 8 | 53.712 7 | 41.126 1 | 47.323 1 | 47.673 7 |
| 顺序转换法 | 46.235 7 | 56.565 8 | 55.263 7 | 41.534 7 | 46.765 3 | 49.897 1 |
| 多元变化检测法 | 47.412 8 | 55.234 7 | 55.058 4 | 40.637 5 | 47.278 1 | 50.617 1 |
| 随机森林归一化法 | 39.587 2 | 42.853 2 | 40.018 0 | 39.417 2 | 45.954 1 | 48.371 1 |
| 参考影像 | 36.782 7 | 41.524 5 | 44.677 1 | 40.200 7 | 41.012 0 | 42.290 7 |

表 6 各种归一化方法的峰值信噪比评价值

Table 6 The peak signal to noise ratio estimates calculated from diverse normalization methods

| 方法 | Band2 | Band3 | Band4 | Band5 | Band6 | Band7 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 直方图匹配法 | 12.633 1 | 11.369 8 | 10.334 7 | 10.868 7 | 13.456 8 | 11.063 5 |
| 顺序转换法 | 12.984 2 | 11.768 8 | 10.947 5 | 11.412 6 | 13.656 6 | 11.635 7 |
| 多元变化检测法 | 12.630 9 | 11.521 5 | 10.521 5 | 11.154 8 | 13.558 4 | 11.256 2 |
| 随机森林归一化法 | 11.265 8 | 11.665 2 | 10.763 9 | 11.548 6 | 13.833 5 | 11.712 6 |

表 7 各种归一化方法的交互信息量评价值

Table 7 The mutual information estimates calculated from diverse normalization methods

| 方法 | Band2 | Band3 | Band4 | Band5 | Band6 | Band7 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 直方图匹配法 | 0.380 6 | 0.295 4 | 0.280 7 | 0.342 6 | 0.501 0 | 0.511 2 |
| 顺序转换法 | 0.385 8 | 0.298 6 | 0.289 9 | 0.353 5 | 0.515 6 | 0.526 2 |
| 多元变化检测法 | 0.378 2 | 0.297 3 | 0.280 4 | 0.351 1 | 0.510 5 | 0.518 3 |
| 随机森林归一化法 | 0.379 6 | 0.293 0 | 0.278 2 | 0.348 6 | 0.503 8 | 0.514 5 |

4 结论与讨论

本研究在对多时相遥感影像辐射特征分析的 基础上,提出了基于像元对和基于分布的相对辐 射归一化方法,并利用多个归一化评价指标进行 了性能评价,比较得出顺序转化法的归一化效果 最优,其次是多元变化检测法、随机森林归一化 和直方图匹配法。表明在本研究中顺序转化法对 因太阳照度几何、大气状态以及影像获取时间等 方面差异具有良好的校正效果,可为多时相遥感 影像的协同利用提供参考。

基于像元对的归一化方法多用于中低分辨率 遥感影像。基于像元的辐射归一化方法多数都具 有一定的主观性,由于操作者的智能作为算法的 输入之一, 伪不变特征点选择的准确性往往较 高,因而归一化性能也相应较好^[25]。综合考虑获 取影像所在的地理位置,基于像元对的相对辐射 归一化方法会受到地面土地覆盖、不透水层、地 形起伏等影响,因此在选择归一化方法时要综合 考虑应用的目的、该区域的地形特征以及归一化 方法的难易程度。在此基础上应多发展自动识别 不变特征点技术以及能够约束伪不变特征点选取 的条件[26]。如多元变化检测法和随机森林归一化 法属于基于像元的归一化方法,均是通过检测得 到伪不变特征点,建立归一化模型进而得到归一 化影像。但多元变化检测法能实现自动化地选 点,而随机森林归一化法在选择伪不变特征点仅 选择了高亮度像元(城市建筑)和低亮度像元 (水体),同时在利用随机森林进行建模时也会 产生一定的建模误差,因此该方法得到的归一化 影像效果会差于多元变化检测法。在今后的研究 中,可以尝试选择合适的阈值限制不变区域内用 于建模的不变特征点,同时选用相关性较高的变 量用于建模,这样会更有利于提升随机森林归一 化性能。

在运用基于分布的归一化方法考虑的是整个 影像数据的分布特征,在进行归一化操作是不需 要选择伪不变特征点,消除了主观上选点的误差。 另外该方法的效果也不依赖多时相遥感影像配准 的精度,相对来说有着快速、简单、客观的优点。 并且,这种方法能应用到多种高分辨率多时相遥 感影像上,它不需要考虑多时相影像之间光谱相 似性和连续性带来的问题^[14]。在对多时相跨传感 器高分辨遥感影像进行辐射归一化时,即使更好 地改进了基于像元对的相对辐射归一化方法,但 归一化效果都不及基于分布的相对辐射归一化方法^[27]。本研究中顺序转换法和直方图属于基于分布的归一化方法,其中顺序转换法将影像的像元 灰度值转换成了顺序值进行了归一化操作,它避 免了主观选择伪不变特征点的局限性,因此得到 的归一化影像质量也会更好。而直方图匹配法在 消除2期影像辐射差异时容易造成原始光谱特性 的扭曲,不利于后续的地物变化信息提取,但用 在图像拼接等应用是否有着可观的效果有待进一 步研究。尽管如此,在今后需要批量对多景遥感 影像进行归一化操作时,为了避免多景影像同时 选取伪不变特征点的繁琐操作,未来的算法发展 应该更多关注基于分布的归一化实施方面。

[参考文献]

- [1] Li C H, Xu H Q. Automatic absolute radiometric normalization of satellite imagery with ENVI/IDL programming[C]//2nd International Congress on Image and Signal Processing (CISP), Tianjin, China, October 17-19, 2009.
- [2] Chen X X, Vierling L, Deering D. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(1): 63–79.
- [3] 余晓敏, 邹勤. 多时相遥感影像辐射归一化方法综述 [J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(6): 8-12.
- [4] 胡昌苗, 张微, 冯峥, 等. Landsat TM/ETM+与 HJ-1A/B CCD 数据自动相对辐射处理及精度验证 [J].
 遥感学报, 2014, 18(2): 267-286.
- [5] Xu Q, Hou Z Y, Tokola T. Relative radiometric correction of multi-temporal ALOS AVNIR-2 data for the estimation of forest attributes [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 68: 69–78.
- [6] 李明诗,梅昭容.不同相对辐射归一化方法在土地覆 盖变化检测中的评价 [J].南京林业大学学报(自然 科学版),2017,41(4):1-7.
- [7] 徐凯健, 曾宏达, 朱小波, 等. 基于五种大气校正的多时相森林碳储量遥感反演研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3493-3498.
- [8] 陈崇成,黄方红,黄绚.自动散点控制回归技术在遥 感数据辐射归一化中的应用 [J].地球信息科学, 2000, 2(2): 52-55.
- [9] Canty M J, Nielsen A A, Schmidt M. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite im-

agery [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3/4): 441-451.

- [10] Zhang L, Yang L, Lin H, et al. Automatic relative radiometric normalization using iteratively weighted least square regression [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(2): 459–470.
- [11] Seo D K, Kim Y H, Eo Y D, et al. Generation of radiometric, phenological normalized image based on random forest regression for change detection [J]. Remote Sensing, 2017, 9(11): 1163.
- [12] Yu X M, Zhan F B, Hu J X, et al. Radiometric normalization for multitemporal and multispectral high resolution satellite images using ordinal conversion[C]//18th International Conference on Geoinformatics, Beijing, China, June 18-20, 2010.
- [13] 申佩佩. 基于数据挖掘技术的航摄影像土地利用变 化检测研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [14] Cao B, Du Y M, Xu D Q, et al. An improved histogram matching algorithm for the removal of striping noise in optical remote sensing imagery [J]. Optik, 2015, 126(23): 4723–4730.
- [15] Nelson T, Wilson H G, Boots B, et al. Use of ordinal conversion for radiometric normalization and change detection [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(3): 535–541.
- [16] Bai Y, Tang P, Hu C M. Kernel mad algorithm for relative radiometric normalization [J]. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, III-1: 49–53.
- [17] Zhang Y J, Yu L, Sun M W, et al. A mixed radiometric normalization method for mosaicking of high-resolution satellite imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(5): 2972–2984.
- [18] Luo J B, Etz S P, Gray R T, et al. Normalized Kemeny

and Snell distance: a novel metric for quantitative evaluation of rank-order similarity of images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(8): 1147–1151.

- [19] 佴兆骏,段洪涛,朱利,等. 基于环境卫星 CCD 数据的太湖蓝藻水华监测算法研究 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 624-634.
- [20] 曹林,徐婷,申鑫,等.集成 Landsat OLI 和机载 Li DAR 条带数据的亚热带森林生物量制图 [J]. 遥感学 报, 2016, 20(4): 665-678.
- [21] 刘锟,付晶莹,李飞.高分一号卫星 4 种融合方法评价 [J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 980-986.
- [22] 王敏华. 遥感图像融合方法的研究 [D]. 桂林: 广西师 范大学, 2017.
- [23] 肖祥元,景文博,赵海丽.基于峰值信噪比改进的图 像增强算法 [J].长春理工大学学报 (自然科学版), 2017,40(4):83-86,92.
- [24] 强赞霞. 遥感图像的融合及应用 [D]. 武汉: 华中科技 大学, 2005.
- [25] 邵艳坡, 洪友堂. 遥感影像相对辐射校正的 PIF 方法 [J]. 国土资源遥感, 2017, 29(1): 7-13.
- [26] 黄启厅, 覃泽林, 曾志康. 多源多时相遥感影像相对 辐射归一化方法研究 [J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(5): 606-614.
- [27] Hong G, Zhang Y. A comparative study on radiometric normalization using high resolution satellite images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(2): 425–438.

(责任编辑 陆 驰)

