

引文格式:岳照溪,张永军,段延松,等.DEM 辅助的卫星光学遥感影像山体阴影检测与地形辐射校正[J].测绘学报,2018,47(1):113-122. DOI:10.11947/j.AGCS.2018.20170194.
YUE Zhaoxi, ZHANG Yongjun, DUAN Yansong, et al. DEM Assisted Shadow Detection and Topography Correction of Satellite Remote Sensing Images in Mountainous Area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(1): 113-122. DOI:10.11947/j.AGCS.2018.20170194.

DEM 辅助的卫星光学遥感影像山体阴影检测与地形辐射校正

岳照溪,张永军,段延松,余 磊

武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉 430079

DEM Assisted Shadow Detection and Topography Correction of Satellite Remote Sensing Images in Mountainous Area

YUE Zhaoxi, ZHANG Yongjun, DUAN Yansong, YU Lei

School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: A shadow detection and topography correction method based on DEM is proposed. Firstly, characteristic method is used to detect the shadow area in the satellite imagery. Then the shady slope and cast shadow area can be detected by model method using DEM data. The shadow is divided into 8 categories with the cause of formation. And then, the compensation method of shadow area and topography correction model are used to correct the optical remote sensing satellite imagery. The results suggest that the proposed method can recover the shadow area information effectively and weaken the effect of terrain.

Key words: topography correction; shadow detection; DEM; optical remote sensing satellite imagery

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (No. 41322010)

摘 要:提出一种结合 DEM 的山体阴影检测与地形辐射校正方法。首先对卫星影像多波段信息用特征法进行阴影检测,然后结合 DEM 数据用模型法进行山体背阴面检测以及投影区域检测,将 3 个结果综合分析,按照形成原因将阴影检测结果分为 8 类,最后结合太阳入射角信息,利用信息匹配的阴影补偿法和地形辐射校正物理模型,进行卫星光学遥感影像辐射校正。试验证明该方法能恢复山体阴影区的信息,并且有效降低地形效应的影响。

关键词:地形辐射校正;阴影检测;DEM;卫星光学遥感影像

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2018)01-0113-10

基金项目:国家自然科学基金(41322010)

山地区域的遥感影像会因地形引起目标辐射特性差异,产生同物异谱或同谱异物现象,影响地物解译、分类与反演的结果^[1]。地形辐射校正旨在削弱甚至消除地形因素对辐射值产生的影响。

阴影是地形效应的最主要形式,其对地表辐射值的减弱降低了影像数据的利用效率,所以在地形辐射校正前先进行阴影检测与修复,有利于遥感影像的分析与应用。阴影检测方法主要有模型法与特征法两种方法^[2],单一的方法总是存在局限性,结合高空间、高光谱分辨率数据,以及高精度的 DEM 数据,可以同时利用两种方法的优势,提高阴影检测的精度^[3]。

对于检测出的阴影区进行修复时,修复方法主要有阴影增强^[4]、基于整体变分阴影补偿^[5]和纹理匹配阴影补偿等^[6],也有重建光源模型^[7],利用阴影的恒常特性估计标准光照条件下阴影区域地物应有的信息的补偿方法,以及用图像增强方法,如线性拉伸修正、分形插值、同态滤波^[8-10]等,都可以恢复阴影区域的信息。由于山地阴影的特殊性,阴影与非阴影之间不能找到合适的过渡区,难以直接利用阴影修复方法对山区阴影的像素进行拉伸与修复,并且阴影修复没有考虑向阳面过亮的问题,不能很好地达到地形效应的去除效果。

传统地形辐射校正结合了 DEM 的信息,可

以同时处理向阳面过亮以及背阴面过暗的问题,常用的模型有 C、SCS、cosin、Minnaert、VECA、三因子改正模型等^[11],还有针对 C 校正的改进模型^[12-13]、Minnaert 的改进模型^[14-15],基于变分 Retinex 的校正法^[16]等。但是地形辐射校正物理模型只依据 DEM 与太阳之间的关系,逐像元地进行校正,山体间的相互关系考虑不充分,出现过校正和欠校正的情况。

本文提出一种基于 DEM 的山体阴影检测与地形辐射校正算法,充分利用了影像数据的多波段信息、DEM 以及山体间的相互关系,将阴影按照定义进行更为精确的检测分类,并结合阴影修复与地形辐射校正模型,依据阴影的产生原因,对不同的地形区域进行不同方法的校正,对阴影较深的区域进行更好地修复,从而对传统物理模型的地形辐射校正效果有所改进。

1 山体阴影检测

阴影从构成原理上分为本影、投影以及半影区,这 3 种阴影在阴影检测中都被分为阴影区^[17]。由于产生阴影的原因不同(如图 1 所示),在恢复不同阴影处信息的时候,就需要不同的校正方法。同时,有的山区背阴面在产生原理上不是阴影,但是在遥感影像中往往亮度较暗,在一般阴影检测中被判为阴影,这些都会影响地形辐射校正的精度。

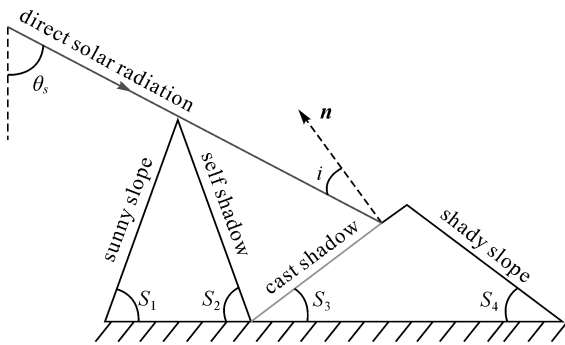


图 1 山体表面阴影示意图

Fig.1 Mountainous surfaces

图 1 中 θ_s 为太阳天顶角; S_1 — S_4 为不同坡面的坡度角; i 为太阳入射角。

本文提出的阴影检测方法融合了模型法与特征法,将阴影检测分为 3 个独立的步骤,对山区阴影进行分类处理,然后综合分析。

首先用多波段信息进行基于色彩空间的阴影

检测。将 RGB 波段转到 HSI 空间,引入蓝通道归一化信息,并用近红外波段的数据去除云和水^[18-19],最终用阈值法得到阴影区和非阴影区。利用特征 P ,如式(1)所示,增强低亮度和高色调的对比,使阈值更加明显,并改善阴影检测^[2]

$$P = (H + 1) / (I + 1) \quad (1)$$

式中, H 与 I 分别是 HSI 色彩空间的色调与亮度。根据式(1)得到最终的阴影检测结果

$$\text{set}_1 = \text{set}_{1S} + \text{set}_{1L} \quad (2)$$

式中, set_1 为第 1 步阴影检测结果; set_{1S} 为阴影像素集合; set_{1L} 为非阴影像素集合。

然后利用 DEM 和太阳角度信息计算得到每个像素位置处的太阳入射角信息^[20],如式(3)所示

$$\cos i = \cos \theta_s \cos S + \sin \theta_s \sin S \cos(\phi_s - A) \quad (3)$$

式中, i 为太阳入射角; θ_s 为太阳天顶角; S 为坡度角; ϕ_s 为太阳方位角; A 为坡向。用阈值法区分出水平面、背阴面以及向阳面。根据式(3)可得

$$\text{set}_2 = \text{set}_{2S} + \text{set}_{2L} \quad (4)$$

式中, set_2 为第 2 步阴影检测结果; set_{2S} 为背阴面像素集合; set_{2L} 为非背阴面像素集合。

接着进行本影以及投影检测,依据地形的相关关系与太阳高度角进行计算^[11]。本影的产生条件是在太阳入射方向上的坡度角 θ_{sn} 大于或等于太阳高度角 θ_s 。其中 θ_{sn} 如式(5)所示

$$\theta_{sn} = \arctan(-\tan \theta_n \cos(\phi_s - \phi_n)) \quad (5)$$

式中, θ_n 为坡度; ϕ_s 为太阳方位角; ϕ_n 为坡向;太阳方位角 ϕ_s 与坡向 ϕ_n 以正北为起始方向,顺时针为正。

若 $\theta_{sn} \geq \theta_s$,则为本影,反之不产生本影。投影的检测为在太阳入射方向按间隔取采样点,分别用高程计算地形遮蔽角 θ_j 。若 $\theta_j \geq \theta_s$,则视为遮蔽,并计算在该条射线上遮蔽点所占的比例,就可以得出该点受遮蔽的程度,从而进行相对应的校正,其中 θ_j 的计算如式(6)所示

$$\theta_j = \arctan(H_j - H_o) / (j \Delta L) \quad (6)$$

式中, H_j 为各采样点高程; H_o 为地面单元 O 点的高程; θ_j 是地面单元 O 点至 j 点间的仰角; ΔL 为采样点间的步长。最终得到

$$\text{set}_3 = \text{set}_{3S} + \text{set}_{3L} \quad (7)$$

式中, set_3 为第 3 步阴影检测结果; set_{3S} 为投影与本影像素集合; set_{3L} 为非投影像素集合。

2 阴影补偿

由于山区阴影产生原因的复杂性,单一的地形辐射校正或者阴影补偿方法不能对各种情况做到合理的处理。本文综合阴影修复与地形辐射校正模型的长处,并结合对 $\cos i$ 的调整,对山区阴

影进行补偿与校正。

阴影检测的结果中,对阴影进行了细致的定义与划分,所以在阴影修复中,对不同的阴影进行区别处理。3 种结果综合,就组合成了 8 种不同的地形与阴影定义,整理后见表 1。

表 1 8 种阴影检测结果的综合分析

Tab.1 Comprehensive analysis of three kinds of shadow detection results

阴影检测结果	产生原因	校正方法	阴影结果图颜色
$S = \{set_{1S} \cap set_{2L} \cap set_{3L}\}$	影像上亮度较暗,向阳面无投影区,说明地物本身反射率低	$\cos i$ 校正 + 传统地形辐射校正	红
$S = \{set_{1S} \cap set_{2L} \cap set_{3S}\}$	亮度较暗,向阳面有投影区,说明是投影产生阴影	阴影补偿法 + 传统地形辐射校正	红 + 蓝
$S = \{set_{1S} \cap set_{2S} \cap set_{3L}\}$	亮度较暗,背阴面无投影区,说明背阴面直射光少	传统地形辐射校正	红 + 绿
$S = \{set_{1S} \cap set_{2S} \cap set_{3S}\}$	亮度较暗,背阴面有投影区,说明完全没有直射光	阴影补偿法 + 传统地形辐射校正	红 + 绿 + 蓝
$S = \{set_{1L} \cap set_{2L} \cap set_{3L}\}$	亮度较亮,向阳面无投影区	传统地形辐射校正	黑
$S = \{set_{1L} \cap set_{2L} \cap set_{3S}\}$	亮度较亮,向阳面有投影区,误检或者坡度平缓,受大气散射光影响	坡度小则不处理,坡度大则阴影补偿	蓝
$S = \{set_{1L} \cap set_{2S} \cap set_{3L}\}$	亮度较亮,背阴面无投影区	传统地形辐射校正	绿
$S = \{set_{1L} \cap set_{2S} \cap set_{3S}\}$	亮度较亮,背阴面有投影区,误检或者坡度平缓,大气散射光多	坡度小则不处理,坡度大则阴影补偿	绿 + 蓝

表 1 中详细展示了阴影检测结果中各种情况的出现原因,并针对每种情况作出对应的校正,将 3 种阴影检测结果分别赋值于红、绿、蓝波段,得到综合的结果图,其中红色为 set_{1S} ,绿色为 set_{2S} ,蓝色区为 set_{3S} ,非阴影区及向阳面等赋值为 0,故为黑色。

在校正方法中主要有传统校正法与阴影补偿法,并且依照经验模型对太阳入射角余弦值进行调整。传统地形辐射校正法,是逐像素的按照几何物理模型校正,本文分别采用的 C 校正^[23]、SCS+C^[24]校正与 VECA^[25]校正,其模型分别如式(8)–(10)所示

$$L_H = L_T \frac{\cos(\theta_s) + C_{(\lambda)}}{\cos i + C_{(\lambda)}} \quad (8)$$

$$L_H = L_T \frac{\cos(\theta_s) \cos S + C_{(\lambda)}}{\cos i + C_{(\lambda)}} \quad (9)$$

$$L_H = L_T \frac{L_a}{m \cos i + b} \quad (10)$$

式中, L_H 为水平面的辐亮度值; L_T 为倾斜表面的辐射值; θ_s 为太阳天顶角; S 为坡度角; i 为太阳入射角; $C_{(\lambda)}$ 为分波段计算得到的统计值; L_a 为校正前像素辐亮度平均值; m 、 b 分别为辐射值与 $\cos i$ 线性回归方程的斜率与截距。

阴影补偿中,首先采用小波变换的方法,将影

像分为高频与低频,在对低频部分用一种利用局部均值与方差进行补偿的映射模型进行增强处理^[22],如式(11)所示

$$LC'(i, j) = m_L + \frac{\sigma_L}{\sigma_S} [LC(i, j) - m_S] \quad (11)$$

式中, $LC(i, j)$ 与 $LC'(i, j)$ 分别为原始与校正后的影像低频系数; m_L 、 m_S 分别为该区域理想情况下以及阴影情况下低频系数的均值; σ_L 与 σ_S 分别为理想情况下与阴影情况下低频系数的均方差。

在这里,阴影补偿的目的是将投影区的亮度调节成为不受投影影响的情况,这就需要在该区域附近寻找地形相似,且地物类型相近的非投影区,用这个作为理想情况下的亮度,对投影区进行亮度的拉伸,所以也叫作投影补偿。投影补偿后的影像亮度,仍旧是倾斜地表的亮度,只是去除了遮挡关系的影响,因此投影补偿后的区域还是要结合地形辐射校正模型,才能得到水平地表的亮度值。

在投影区域附近寻找不受投影影响的区域时,首先用 HSV 变换得到亮度图,用于将少数高亮的地面点视为粗差去除,然后在该像素周围邻域内计算 $\cos i$ 、坡度以及高程的距离,如式(12)所示

$$\text{dist}_t = \sqrt{(\cos i_j - \cos i_o)^2 + (\text{hight}_j - \text{hight}_o)^2 + (\text{slope}_j - \text{slope}_o)^2} \quad (12)$$

式中, i_j 与 i_o 分别为非投影与投影区太阳入射角; hight_j 与 hight_o 分别为非投影与投影区高度; slope_j 与 slope_o 分别为非投影与投影区坡度角。对归一化后的 3 个量进行计算,并用 dist_t 选出地形相近的像素集,然后计算该像素集中的光谱角 θ 与 NDVI,并计算欧氏距离 dist_s ,如式(13)所示,用阈值法找到与原像素地物类型也相近的像素集

$$\text{dist}_s = \sqrt{(\theta_j - \theta_o)^2 + (\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_o)^2} \quad (13)$$

式中, θ_j 与 θ_o 分别为像素集中待匹配像素与原像素的光谱角; NDVI_j 与 NDVI_o 分别为像素集中待匹配像素与原像素的归一化植被指数。光谱角计算^[26]如式(14)所示

$$\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{X}\mathbf{Y}}{|\mathbf{X}||\mathbf{Y}|}\right) \quad (14)$$

式中, θ 为光谱角; \mathbf{X} 与 \mathbf{Y} 分别是两像素处不同波段辐射亮度值组成的一维向量。

对于选定的地形与地物都相近的像素集,在求均值与方差的时候,用式(15)作为权值,以保证与原像素点地形和地物类型越相似的,对原像素的影响越大,避免出现不同区域植被不同,以及大气情况复杂等诸多因素引入不必要的误差,从而带来的精度降低。最后对投影区校正后的影像进行地形辐射校正,得到结果

$$\text{weight} = \sqrt{\text{dist}_t^2 + \text{dist}_s^2} \quad (15)$$

式中, dist_t 表示地形的相似度; dist_s 表示光谱的相似度。

对于影像检测结果为阴影,但是却是向阳面的部分,采用调整太阳入射角余弦值 $\cos i$ 的方法进行校正^[21]。这些区域在传统地形辐射校正模型中不能得到很好的校正,是因为该区域受环境光以及邻近像元区域的影响,计算所得 $\cos i$ 与真实情况不相符,使得辐射值与 $\cos i$ 并不满足线性关系,所以用式(16)对 $\cos i$ 进行调整,得到 $\cos i'$ 作为改正后的太阳入射角余弦值,代入校正模型进行校正

$$\cos i' = \cos i \left(\frac{La - b}{m} \right) \quad (16)$$

式中, $\cos i$ 与 $\cos i'$ 分别为原至于调整后的太阳入射角余弦值; L_a 为校正前像素辐射亮度平均值; m 、 b 分别为辐射值与 $\cos i$ 线性回归方程的斜率与截距。

3 试验数据与结果分析

为对本文方法进行验证,选用 Landsat 8 湖北双峰山区域的影像进行试验,影像的空间分辨率为 30 m。DEM 为 5 m 分辨率的数据,由资源三号影像密集匹配得到。为了保证各种情况的阴影都存在,选取的测试区域高程差为 800 m,平均高程为 160 m,并选用太阳高度角较低的影像进行试验。本文分别对两组数据采用 3 种传统地形辐射校正模型进行试验,并将本文方法结合 3 种方法,得到对比的结果,试验结果如图 2—7 所示。

DEM 数据与 Landsat 8 影像的空间对应精度会影响试验的结果^[27],本试验中 Landsat 8 为正射影像,与 DEM 在空间上可以对应,不在此讨论空间对应精度对试验结果的影响。

3.1 阴影检测结果

第 1 组影像的太阳方位角为 151.5019° ,太阳高度角为 48.1773° ,第 2 组影像的太阳方位角为 150.1172° ,太阳高度角为 50.2696° 。

图 2(a)和图 3(a)为同一地区不同时间的 Landsat 8 影像。图 2(d)和图 3(d)是 3 种阴影检测结果的综合分析,其中:

红色部分是利用多波段数据检测的阴影结果,就是原影像中较暗,所以信息量减少的区域,即图 2(b)和图 3(b)的检测结果。

绿色部分是利用 DEM 与太阳角度信息计算所得 $\cos i$ 值得到的背阴面, $\cos i$ 结果如图 2(c)和图 3(c)所示,用阈值法就可以得到 $\cos i$ 大的山体背阴面。

蓝色区域是利用山体间的相关关系所得落影检测结果,黑色区域为无影区。

详细的阴影分类分析见表 1,这样就实现了从原理上对不同的阴影进行区分,使得校正更加精确有效。图 2 和图 3 的 3 种阴影检测结果对比中,可以看出单一的阴影检测结果都不能完整地包含所有可能产生阴影区域,对阴影并不能做出很好的判定。由于每种结果都将影像分为阴影与非阴影两部分,将 3 种结果综合分析便得到 8 种阴影的分类。表 1 对 8 种结果作了详细说明,可以对地形和阴影有更全面的把握。

3.2 地形辐射校正结果

根据表 1 对不同地形及阴影的分类,得到了

多波段阴影检测结果、背阴面及投影区的综合分析结果,结合地形辐射校正模型 C、SCS+C 及 VECA,分别对两张影像用不同的方法进行组合

校正,得到的地形辐射校正结果与原校正模型的校正结果进行对比,如图 4—7 所示。

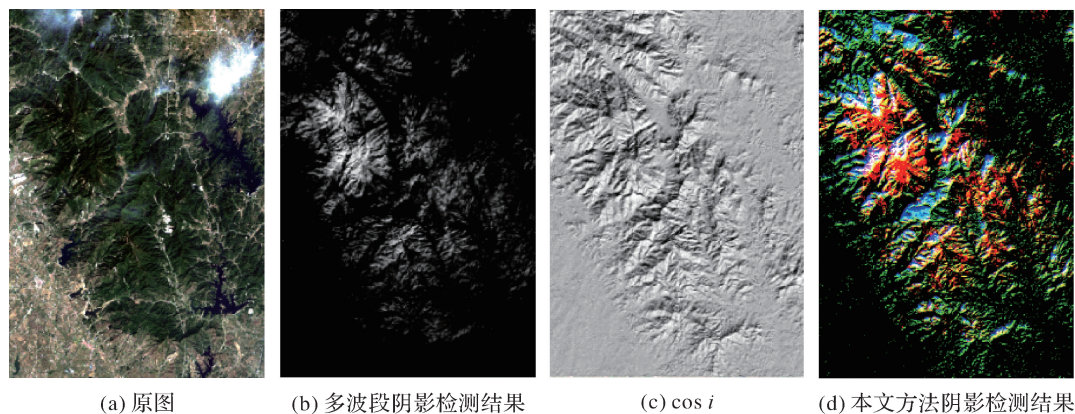


图 2 第 1 组阴影检测结果

Fig.2 The first group results of shadow detection

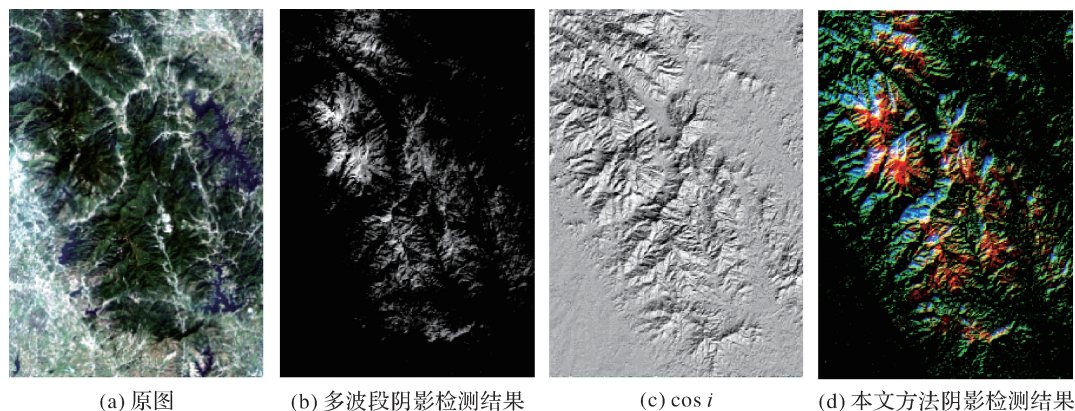


图 3 第 2 组阴影检测结果

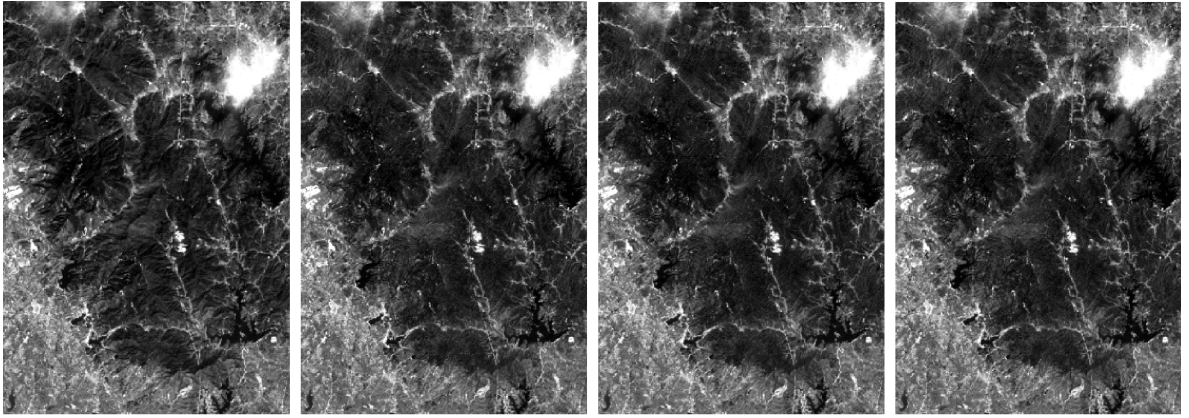
Fig.3 The second group results of shadow detection

该区域地表覆盖类型主要是植被,同时也有水、裸地及其他地物类型。可以看出本文方法进行的阴影校正可以更加有效提高阴影区的亮度,有效地降低了波段辐射值与地形的关系,并且对无须校正的水与裸地区域,以及水平的植被区,都能保持原辐亮度值,没有改变地物类型。

对得到的影像结果进行统计特征分析,得到各方法校正前后的统计值,均值体现整张影像的亮度,均值越大表明整体亮度越亮,方差体现色彩的均匀性,在地形辐射校正中就说明背阴面与向阳面的亮度差异越小,地形辐射校正的效果也就越好。表 2 中对整幅影像的全部像素进行了统计值的计算,并对校正前后的均值与方差值。可以看出本文方法对影像均值有所提升,方差有所减小,以波段 3 为例,校正前的均值为 35.882 5,C

校正后均值为 36.289 8,结合本文方法后,均值为 36.562 2,同样,加入本文方法后,原方差 7.819 8 也减小为 7.454 78。这是因为本文方法对较暗的投影面与自影面,都在保证原地物类型的前提下,进行了有效的恢复。

表 3 对比了校正前后斜率值。斜率体现了各个波段的辐亮度值与地形之间的相关关系,是衡量地形辐射校正结果的最重要参数,斜率越小,则辐亮度值于地形的线性相关越小,即影像受地形影响越小。如表 3 所示,以波段 4 为例,校正前的斜率为 13.395 9,经 C 校正后减小为 2.858 45,结合本文方法后,则减小到 1.885 01,可以看出本文方法在各个波段都能对斜率有所减小,对传统的地形辐射校正模型有改进的效果。

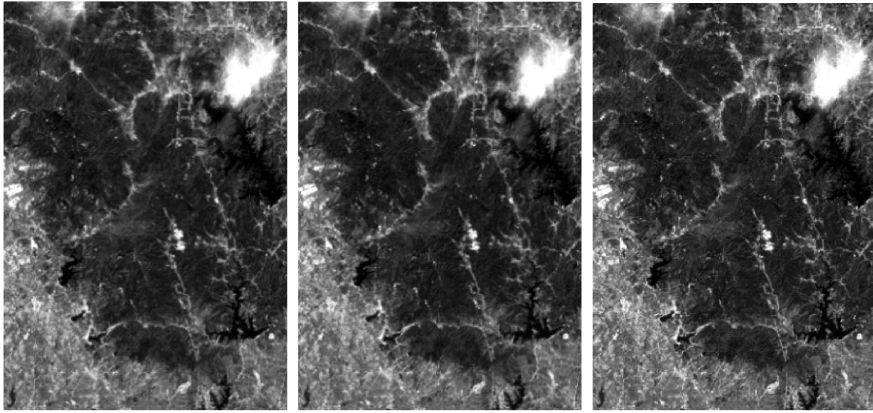


(a) 原图

(b) C校正

(c) SCS+C校正

(d) VECA校正



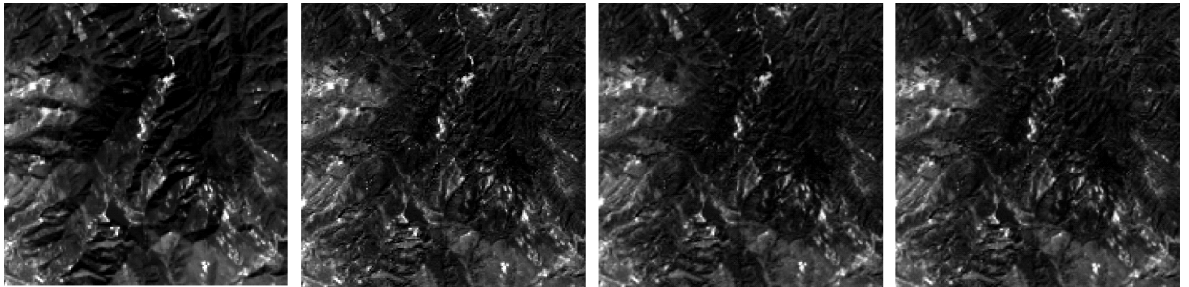
(e) 本文方法结合C校正

(f) 本文方法结合SCS+C校正

(g) 本文方法结合VECA校正

图4 第1组阴影校正结果

Fig.4 Topography correction results of the first group images

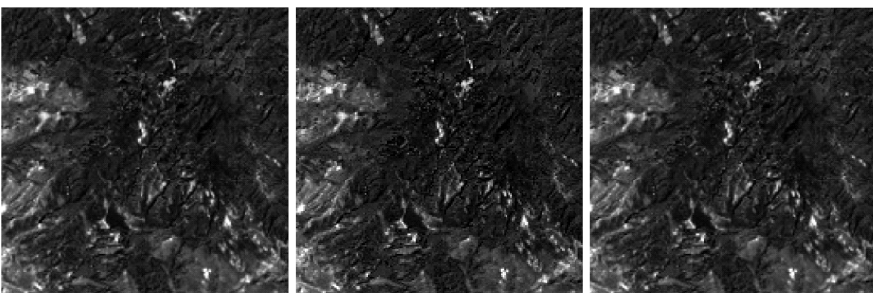


(a) 原图

(b) C校正

(c) SCS+C校正

(d) VECA校正



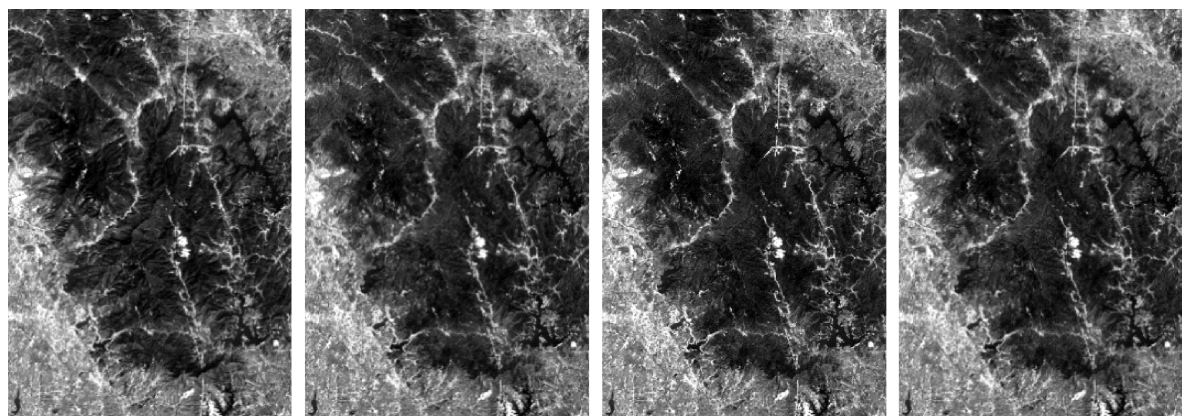
(e) 本文方法结合C校正

(f) 本文方法结合SCS+C校正

(g) 本文方法结合VECA校正

图5 第1组阴影校正结果局部放大

Fig.5 The enlargement of topography correction results of the first group images

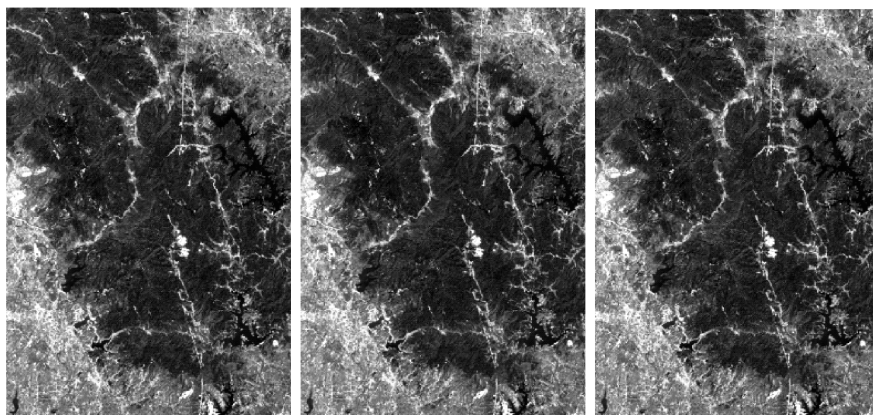


(a) 原图

(b) C校正

(c) SCS+C校正

(d) VECA校正



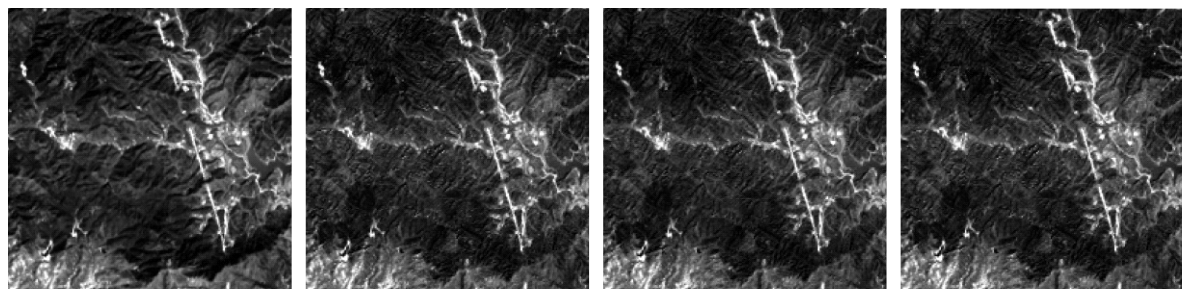
(e) 本文方法结合C校正

(f) 本文方法结合SCS+C校正

(g) 本文方法结合VECA校正

图 6 第 2 组阴影校正结果

Fig.6 Topography correction results of the second group images

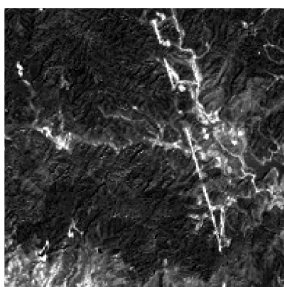
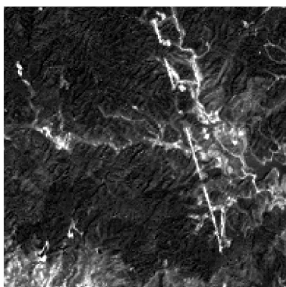
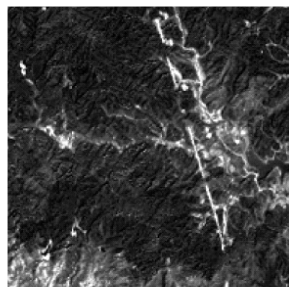


(a) 原图

(b) C校正

(c) SCS+C校正

(d) VECA校正



(e) 本文方法结合C校正

(f) 本文方法结合SCS+C校正

(g) 本文方法结合VECA校正

图 7 第 2 组阴影校正结果局部放大

Fig.7 The enlargement of topography correction results of the second group images

表 2 地形辐射校正前后各波段辐亮度值的均值与方差

Tab.2 The mean and SD of different wavelength of radiance before and after topography correction

目标	指标	band 1	band 2	band 3	band 4	band 5	band 7
原图	mean	56.954 5	47.495 8	35.882 5	23.736 4	52.240 9	1.506 16
	SD	5.990 73	6.897 28	7.819 84	8.917 94	13.761	0.703 99
C	mean	57.144 6	47.744	36.289 8	24.122 9	53.143 4	1.546 86
	SD	5.938 51	6.822 36	7.649 21	8.820 02	13.314 2	0.695 35
C+ 本文方法	mean	57.254 1	47.886 7	36.562 2	24.346 7	54.155 9	1.577 38
	SD	5.861 45	6.720 66	7.454 78	8.664 8	13.025 8	0.678 94
SCS	mean	56.936 5	47.475 3	35.893 5	23.726 5	52.080 1	1.503 57
	SD	5.984 64	6.878 92	7.718 18	8.849 85	12.935 5	0.690 08
SCS+ 本文方法	mean	57.045 3	47.616 6	36.119 6	23.942 8	53.055 4	1.532 26
	SD	5.906 21	6.775 57	7.519 68	8.694 45	12.768 5	0.672 95
VECA	mean	56.955 3	47.496 4	35.880 8	23.727 9	52.260 1	1.505 5
	SD	5.918 84	6.786 98	7.563	8.675 59	13.092 9	0.676 75
VECA+ 本文方法	mean	57.064 4	47.638 4	36.150 1	23.948	53.255 7	1.535 2
	SD	5.842 03	6.685 8	7.370 76	8.522 92	12.902 7	0.660 78

表 3 地形辐射校正前后 $\cos i$ 与影像各波段辐亮度值的回归关系斜率

Tab.3 The regression parameters of different wavelength of radiance before and after topography correction

目标	band 1	band 2	band 3	band 4	band 5	band 7
原图	10.106 6	11.033 5	14.783 1	13.395 9	29.898 1	1.324 62
C	4.729 83	4.063 05	3.400 36	2.858 45	3.117 2	0.170 3
C+本文方法	4.438 82	3.646 11	2.215 59	1.885 01	-3.050 66	-0.024 0
SCS	5.301 21	4.815 04	4.663 85	4.096 63	5.913 37	0.312 3
SCS+本文方法	5.013 79	4.405 95	3.523 74	3.176 83	4.081 71	0.135 3
VECA	4.714 16	4.041 98	3.362 04	2.811 65	3.065 39	0.165 7
VECA+本文方法	4.424 12	3.627 2	2.190 62	1.854 14	-2.999 9	-0.023 4

为了评价地形辐射校正的效果,进行进一步统计定量分析,将影像的辐射亮度值与 $\cos i$ 结合,画出散点图并进行线性回归拟合。如图 8 所示,图中纵坐标为影像三波段的辐射亮度值,横坐标为太阳入射角余弦值 $\cos i$, r 为相关系数,体现二者的相关性,mean 为均值,SD 为方差,图中点颜色越浅表示越密集。

从计算结果可以看出校正前辐射亮度值与 $\cos i$ 具有较强的相关关系,斜率为 14.783 1,相关系数为 0.241 7,经 C 校正后斜率为 3.362 04,相关系数为 0.036 6,已经有了一定改进,再结合本方法后,斜率减小为 2.190 62,相关系数减小为 0.013,已经非常接近于 0,说明辐射亮度值与 $\cos i$ 的相关性已经基本消除,再结合均值与方差,可以看出本文方法较未改进前有明显的改善。

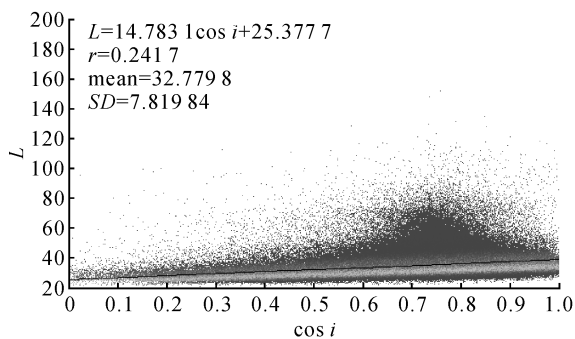
4 结 论

传统地形辐射校正主要是像素级的校正,针对每个像素的地理位置以及与太阳的入射角度关

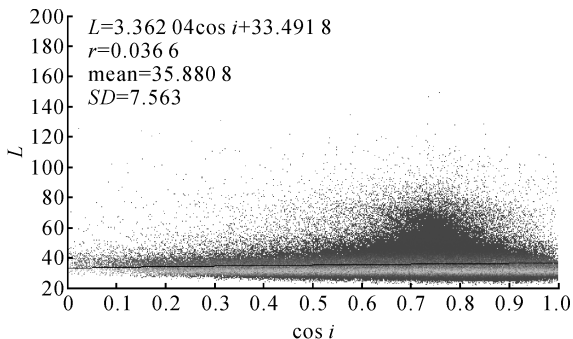
系进行辐射值的校正,虽然这个过程是依据物理模型的,可以得到较理想的结果,但还是存在如过校正或欠校正等问题。本文在阴影检测过程中引入投影的计算,考虑了山体间的相互关系,并且用多波段阴影检测结果进行辅助,即对地形类别和阴影进行了更加精细的分类,考虑到每种阴影产生的原因以及校正方法,并针对每种地形和阴影分别进行校正,从而得到更加理想的结果。这个过程可以理解为对象级的地形辐射校正,从原理上改进了校正的过程与结果。

同时,3种阴影检测结果之间可以相互约束,并且增强了阈值法阴影检测中对阈值选择正确性的宽容度,从而增强了算法的稳定性。

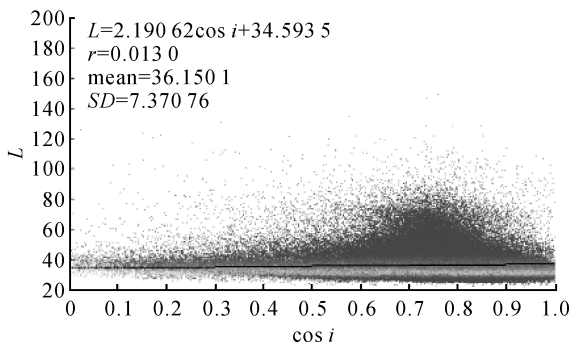
本文试验还有一定的局限性。由于缺少临近像素之间辐亮度的相互约束,会出现个别像素亮度变化不是很平缓,可加入超像素分割法以解决,即用光谱与纹理的统计值在超像素间进行阴影区和非阴影区的匹配与阴影去除,增强了相邻同质像素间的相互约束,从而改善这个问题。



(a) 原图波段3的散点图



(b) VECA模型校正后的散点图



(c) 本文方法结合VECA模型校正后的散点图

图 8 波段 3 的散点图

Fig.8 Scatter plots of band 3

参考文献:

[1] 高永年, 张万昌. 遥感影像地形校正物理模型的简化与改进[J]. 测绘学报, 2008, 37(1): 89-94, 120. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2008.01.016.
GAO Yongnian, ZHANG Wanchang. Simplification and Modification of a Physical Topographic Correction Algorithm for Remotely Sensed Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(1): 89-94, 120. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2008.01.016.

[2] 高贤君, 万幼川, 杨元维, 等. 高分辨率遥感影像阴影的自动检测与自动补偿[J]. 自动化学报, 2014, 40(8): 1170-1720.
GAO Xianjun, WAN Youchuan, YANG Yuanwei, et al. Automatic Shadow Detection and Automatic Compensation in High Resolution Remote Sensing Images[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(8): 1170-1720.

[3] 李翠翠, 樊基仓, 付潇华, 等. 复杂地形山区 Landsat TM 影像 C 校正策略与实验[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 134-141.
LI Cuicui, FAN Jicang, FU Xiaohua, et al. Analysis and Comparison Test on C-Correction Strategies and Their Scale Effects with TM Images in Rugged Mountainous Terrain[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(1): 134-141.

[4] 王树根. 正射影像上阴影和遮蔽的成像机理与信息处理方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2003.

WANG Shugen. Orthophoto of the Shading and Shadowing on Imaging Mechanism and Information Processing Method [D]. Wuhan: Wuhan University, 2003.

[5] SUZUKI A, SHIO A, ARAI H, et al. Dynamic Shadow Compensation of Aerial Images Based on Color and Spatial Analysis [C] // Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition. Barcelona: IEEE, 2000: 317-320.

[6] KANG S H. Mathematical Approaches to Color Denoising and Image Inpainting Problems[D]. Los Angeles: University of California, 2002.

[7] 程剑. 实时动态阴影算法的研究及实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
CHENG Jian. Study and Realization of Real-Time Algorithm of Dynamic Shadows[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

[8] LIU Jiahang, FANG Tao, LI Daren. Shadow Detection in Remotely Sensed Images Based on Self-Adaptive Feature Selection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(12): 5092-5103.

[9] 何凯, 赵红颖, 刘晶晶, 等. 基于分形及纹理分析的城市遥感影像阴影去除[J]. 天津大学学报, 2008, 41(7): 800-804.
HE Kai, ZHAO Hongying, LIU Jingjing, et al. Shadow Removal of City's Remote Sensing Image Based on Fractal and Texture Analysis[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(7): 800-804.

[10] YANG Weidong, GUO W, PENG K, et al. Research on

- Removing Shadow in Workpiece Image Based on Homomorphic Filtering[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 29(10): 2360-2364.
- [11] 高永年, 刘传胜, 王静. 遥感影像地形校正理论基础与方法应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 100-106.
GAO Yongnian, LIU Chuansheng, WANG Jing. *Topography Correction of the Theoretical Basis and Method of Application of Remote Sensing Images*[M]. Beijing: Science Press, 2013: 100-106.
- [12] 黄微, 张良培, 李平湘. 一种改进的卫星影像地形校正算法[J]. *中国图象图形学报*, 2005, 10(9): 1124-1128.
HUANG Wei, ZHANG Liangpei, LI Pingxiang. An Improved Topographic Correction Approach for Satellite Image[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(9): 1124-1128.
- [13] 黄微, 张良培, 李平湘. 一种顾及空间相关性遥感影像辐射度的地形校正算法[J]. *测绘学报*, 2006, 35(3): 285-290. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2006.03.017.
HUANG Wei, ZHANG Liangpei, LI Pingxiang. A Topographic Correction Approach for Radiation of RS Images by Using Spatial Context Information[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(3): 285-290. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2006.03.017.
- [14] GAO Mingliang, GONG Huili, ZHAO Wenji, et al. An Improved Topographic Correction Model Based on Minnaert[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2016, 53(2): 247-264.
- [15] VERRELST J, SCHAEPMAN M E, CLEVERS J G P W. Fusing Minnaert-K Parameter with Spectral Unmixing for Forest Heterogeneity Mapping Using Chris-Proba Data [C]// *Proceedings of the 1st Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing*. Grenoble: IEEE, 2009: 1-4.
- [16] 李慧芳, 沈焕锋, 张良培, 等. 一种基于变分Retinex的遥感影像不均匀性校正方法[J]. *测绘学报*, 2010, 39(6): 585-591, 598.
LI Huifang, SHEN Huanfeng, ZHANG Liangpei, et al. An Uneven Illumination Correction Method Based on Variational Retinex for Remote Sensing Image[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(6): 585-591, 598.
- [17] SHAHTAHMASSEBI A, YANG Ning, WANG Ke, et al. Review of Shadow Detection and De-Shadowing Methods in Remote Sensing[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(4): 403-420.
- [18] 韩延彬, 郭晓鹏, 魏延文, 等. RGB和HSI颜色空间的一种改进的阴影消除算法[J]. *智能系统学报*, 2015, 10(5): 769-774.
HAN Yanbin, GUO Xiaopeng, WEI Yanwen, et al. An Improved Shadow Removal Algorithm Based on RGB and HSI Color Spaces[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2015, 10(5): 769-774.
- [19] 鞠何其. 基于色彩空间变换的遥感影像阴影检测与去除技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- JU Heqi. A Fast Shadow Detection and Removal Algorithm for High Resolution Satellite Images [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [20] 张若岚. 基于ETM+数据的遥感影像地形辐射校正研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
ZHANG Ruolan. The Research on Topographic Correction of Remote Sensing Images Based on ETM + Data [D]. Xian: Chang'an University, 2012.
- [21] LI Huifang, XU Liming, SHEN Huanfeng, et al. A General Variational Framework Considering Cast Shadows for the Topographic Correction of Remote Sensing Imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 117(2): 161-171.
- [22] XIAO Chunxia, XIAO Donglin, ZHANG Ling, et al. Efficient Shadow Removal Using Subregion Matching Illumination Transfer[J]. *Computer Graphics Forum*, 2013, 32(7): 421-430.
- [23] TEILLET P M, GUINDON B, GOODENOUGH D C. On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1982, 8(2): 1537-1540.
- [24] SOENEN S A, PEDDLE D R, COBURN C A. SCS+C: A Modified Sun-Canopy-Sensor Topographic Correction in Forested Terrain [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(9): 2148-2159.
- [25] GAO Yongnian, ZHANG Wanchang. A Simple Empirical Topographic Correction Method for ETM+ Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(9): 2259-2275.
- [26] 吴炜, 骆剑承, 李均力, 等. 面向遥感影像镶嵌的SVR色彩一致性处理[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(12): 1561-1567.
WU Wei, LUO Jiancheng, LI Junli, et al. Support Vector Regression Color Normalization Method For Image Mosaic[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(12): 1561-1567.
- [27] SHEPHERD J D, DYMOND J R, GILLINGHAM S, et al. Accurate Registration of Optical Satellite Imagery with Elevation Models for Topographic Correction[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(7): 637-641.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2017-04-17

修回日期: 2017-07-11

第一作者简介: 岳照溪(1993—),女,硕士生,研究方向为遥感影像阴影检测与去除。

First author: YUE Zhaoxi (1993—), female, postgraduate, majors in the theories and methods of shadow detection and shadow removal of remote sensing images.

E-mail: 931082111@qq.com

通信作者: 段延松

Corresponding author: DUAN Yansong

E-mail: ysduan@whu.edu.cn