

基于图像的 CBERS - CCD 数据大气校正 ——以四川省紫坪铺库区为例

周旭¹, 雷金蓉¹, 张泽洪²

(1. 西华师范大学 国土资源学院, 四川 南充 637009; 2. 西华师范大学 教务处, 四川 南充 637009)

摘要: 作为国产卫星遥感数据, CBERS-CCD 的定量化研究和应用已受到我国学者高度重视, 将其与汶川地震灾区恢复重建工作相结合更具实践价值。以四川省紫坪铺库区为例, 建立了简化的大气校正模型, 并采用改进的基于图像估计参数的方法, 快速完成 CBERS02B-CCD 数据大气校正。结果证实, 该模型方法能够消除大气影响, 增强图像信息, 并能满足一般遥感定量研究与应用的需要, 具有较强的实用性和可推广性。

关键词: CBERS-CCD 数据; 大气校正; 暗目标减法; 多次迭代法; 紫坪铺库区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)02-0154-05

中图分类号: TP79, P422

Image-based Atmospheric Correction Method for CBERS - CCD Data - A Case of Zipingpu Reservoir Area in Sichuan Province

ZHOU Xu¹, LEI Jing-rong¹, ZHANG Ze-hong²

(1. School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China;

2. Teaching Affairs Office of China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China)

Abstract: As the remote sensing data collected with Chinese satellite, CBERS-CCD data and its quantitative research and application attracted heavy attentions from many scholars, especially for the restoration and reconstruction of the areas experienced the Wenchuan earthquake disaster. This research chose Sichuan Zipingpu Reservoir area as the study site, and built a new straightforward model, which used an image-based improving method and the general multiple-iterative method to estimate the required parameters, such as atmospheric path radiance, up and down transmittance, and total optical depth, etc. A few detailed comparisons were also conducted in terms of visual quality, statistical characteristics and NDVI changes of the images before and after atmospheric correction. With this developed model, the atmospheric effects of CBERS-CCD data could be eliminated and the image information also has been enhanced. A conclusion can be drawn that this image-based atmospheric correction model is highly applicable and economically effective.

Keywords: CBERS - CCD data; atmospheric correction; dark object subtract method; multiple-iterative method; Zipingpu Reservoir area

传感器采集地物光谱信息过程中,受到大气分子和气溶胶的吸收、散射作用及地表特性和传感器性能等影响,导致遥感数据带有一定非目标信息^[1]。为了准确表述光谱信息、定量反演实用参数等,需要进行大气校正。它指经过传感器定标后,消除大气影响反演反射率的方法和过程,对图像目视效果及参数反演精度等有重要影响。根据参数来源不同将其分为基于同步测量参数和基于图像估算参数两类。前者如 MORTRAN 6S 和 ATCOR 等,后者有暗目标减法、直

方图匹配法、伪不变目标法等。基于同步测量参数的方法精度较高,但模型复杂,所需参数较多,测量参数费时且成本较高,尤其是对历史数据很难获得测量参数,虽 6S 等采用查找表提供可选大气模式,但全球大气复杂多样,特别是气溶胶有地域性、季节性和随机性特点,并非几种模式即可归纳,因此其应用受到一定限制。基于图像估算参数的方法无需同步测量参数,直接从图像出发,结合合理的假设消除大气影响,能够满足一般遥感研究与应用需要,被认为是最理想

收稿日期: 2011-05-06

修回日期: 2011-08-08

资助项目: 四川省教育厅青年基金项目“基于遥感、GIS 和生态模型的地震灾区土地利用优化研究”(09ZB086); 西华师范大学教学改革与研究项目“依托省级示范中心,创新地理信息系统专业实验实践教学”(JGXM0937)

作者简介: 周旭(1981—),男(汉族),四川省古蔺县人,硕士,讲师,主要从事遥感应用研究和教学工作。E-mail: zxy8178@163.com。

的大气校正及反射率反演方法^[2]。

CBERS—CCD 数据是我国有自主知识产权的多光谱、宽波段卫星遥感数据。李俊生等用 MODIS 反演大气参数对其进行大气校正; 易维宁等用 6S 计算程辐射和向上透过率等, 反演出地表反射率; 王中挺等用 MODTRAN 模拟大气状况, 生成查找表, 完成其大气校正; 朱长明等修改 Landsat-TM 的 ATCOR 模型参数, 实现其大气校正^[3-6]。这些研究的模型方法虽较成熟、简便, 但因可选的大气模式受限, 仍缺乏针对性。不同地区不同数据, 由于地物和大气性质的复杂性, 以及波段设置差异等, 基于图像估算参数的能力有别。因此, 以四川省紫坪铺库区为例, 针对 CBERS—CCD 数据, 建立起简化的大气校正模型, 并用改进的基于图像估算参数及多次迭代的方法完成其大气校正, 为其量化研究与应用提供借鉴。

1 研究区概况与数据来源

研究区为四川省紫坪铺库区, 位于岷江上游、汶

川县东南部与都江堰市西南部接壤处, 103°21'16"—103°41'13"E、30°53'35"—31°08'41"N 之间。覆盖“5·12”汶川地震中心映秀镇和极重灾区紫坪铺镇等, 总面积约 1 010.10 km²。地势从西部山区向东部平原过渡, 气候为湿润的亚热带季风气候, 水系发育, 植被茂密, 土地利用/覆盖类型多样。震后道路中断、植被破坏、耕地损毁、滑坡、泥石流、堰塞湖和水土流失等次生灾害监测与防治急需遥感技术支持。

采用的研究数据为 CBERS02B 星搭载 CCD 接收 5 个波段的光学遥感数据。成像时间 2008 年 11 月 27 日, 轨道号/行号 12/65, 太阳天顶角 53.807 3°, 太阳方位角 344.462 7°, 观测天顶角 0.60°, 观测方位角 170.067 7°, 像元大小 19.5 m × 19.5 m。各波段对应定标系数及大气层外平均太阳辐照度如表 1 所示。研究区内图像大小为 7 052 × 7 034 像元, 平均含云量为 0%, 标准假彩色图像显示正常, 水田、旱地、城镇、道路和深而清洁的水库及浓密植被等地物清晰可辨。

表 1 研究数据重要参数

项目	波段顺序				
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
波段范围/μm	0.45 ~ 0.52	0.52 ~ 0.59	0.63 ~ 0.69	0.77 ~ 0.89	0.51 ~ 0.73
定标系数/(W · m ⁻² · sr ⁻¹ · μm ⁻¹)	1.072 5	0.909 8	1.517 0	1.757 7	1.071 1
太阳常数/(W · m ⁻² · sr ⁻¹ · μm ⁻¹)	1 919	1 812	1 523	1 042	1 636

2 大气校正模型假设

大气校正模型是描述太阳光进入大气层后被地表反射到达传感器过程的辐射传输模型或其近似表达。精确校正需要准确求解其中涉及的所有参数, 确实较难实现, 因而许多研究均对“气—地”系统进行合理假设。这里假设大气性质水平均匀且地表特性均匀、朗伯, 则到达地表的总辐射能量(E_λ)为经过入射方向大气衰减的太阳直接辐射(E_{sλ})与下行天空漫射光(E_{dλ})之和, (E_{sλ})受大气层外平均太阳辐照度(E_{0λ})、太阳天顶角(θ)、以日地平均距离为单位的日地距离(D)和太阳光入射方向大气透过率(T_{θλ})等影响, 如公式(1)所示^[7-13]。

$$E_{\lambda} = E_{s\lambda} + E_{d\lambda} = \frac{E_{0\lambda} \cos\theta}{D^2} T_{\theta\lambda} + E_{d\lambda} \quad (1)$$

假设天气晴朗, 天空辐照度各向同性, 忽略大气折射、湍流和偏振以及多次散射辐照作用和邻近像元漫反射作用, 则地物表面反射辐亮度(L_{rλ})为太阳辐照度(E_λ)和表面反射率(ρ_{gλ})的函数, 如公式(2)所示^[7-13]。

$$L_{r\lambda} = \frac{\rho_{g\lambda} (E_{0\lambda} \cos\theta T_{\theta\lambda} E_{d\lambda})}{\pi} \quad (2)$$

传感器接收光谱辐亮度(L_{iλ})是经过观测方向大气衰减的地物表面反射辐亮度(L_{gλ})与大气程辐射(L_{pλ})之和, L_{gλ}受地表特性和传感器天顶角为φ的观测方向大气透过率(T_{φλ})等影响, 如公式(3)所示^[7-13]。

$$L_{i\lambda} = L_{g\lambda} + L_{p\lambda} = L_{r\lambda} T_{\phi\lambda} + L_{p\lambda} \quad (3)$$

综上所述, 可得公式(4):

$$\rho_{g\lambda} = \frac{\pi (L_{i\lambda} - L_{p\lambda})}{T_{\phi\lambda} (E_{0\lambda} \cos\theta T_{\theta\lambda} + E_{d\lambda})} \quad (4)$$

式中: π——常数; L_{iλ}——传感器接收光谱辐亮度, 即传感器定标结果; L_{pλ}——程辐射; E_{0λ}——大气层外平均太阳辐照度, 即太阳常数; θ——太阳天顶角; φ——传感器天顶角; T_{θλ}——太阳光入射方向大气透过率; E_{dλ}——下行天空漫射光辐照度; T_{φλ}——传感器观测方向大气透过率。欲求反射率ρ_{gλ}, 需要估算 L_{pλ}, T_{θλ}, T_{φλ}和 E_{dλ}。

从矛盾的主要方面出发, 大气校正着重消除大气影响。其中, 气溶胶影响是最主要的。因气溶胶一般

位于近地面且变化尺度远大于地表变化尺度,所以这里假设大气性质水平均匀是合理的。假设地表非均匀,需用大气点扩散函数等求解环境辐射大小,无疑会增加模型应用难度,所以从简便出发将其忽略。至于是否需要地表为非朗伯假设,Richter 等针对避开热点观测的、通常的窄视场传感器数据认为没有必要。因此,公式(3) — (4) 建立的模型是合理的,也是简便实用的。

3 大气校正参数估计

3.1 确定程辐射

程辐射指经过大气散射直接进入传感器的太阳辐射。最早的大气校正是 Ahern 等假设深且清洁的水体为暗目标用减法去除程辐射^[7],此后暗目标减法得到改良应用。已有研究^[8-43] 多选水体或浓密植被阴影为暗目标,因为可见光和近红外波段水体反射率非常低(一般小于 2%),浓密植被阴影区内几乎没有太阳光直接照射,即使晴朗的天气用精密的仪器也难测得其反射率。田庆久等指出水体和阴影同时存在时选阴影做暗目标更合理;王中挺等将 NDVI < 0.3 作暗目标阈值;Chavez 等指出如果将暗目标值全部当程辐射可能造成过校正;Kaufman 等假设暗目标反射率为 0.02 ± 0.01;刘小平等假设浓密植被阴影反射率为 0,通过多次迭代确定其程辐射;齐志新等指出暗目标选择应尽可能多,尽可能离散、均匀。

3.2 估算大气透过率

大气影响主要源于分子散射、气体吸收和气溶胶散射与吸收。大气成份除水汽和气溶胶外,其它成份相对稳定。分子散射可用瑞利(Rayleigh)散射理论描述, Van Stokkom 等^[14] 推出分子散射光学厚度与波长和传感器高度关系。Tanre 等^[15] 提出水汽影响很不稳定,传感器设计时应避开水汽吸收波段。气溶胶影响最不稳定、也最为重要,气溶胶散射可用米氏(Mie)散射理论表述, Almeida 等^[16] 以大量数据和图表给出全球主要气溶胶类型及其物理和光学特性等项目。

分别求出分子散射、臭氧吸收、水汽吸收和气溶胶光学厚度后,再求总的大气光学厚度(τ_λ)的方法操作较复杂且可能引入新的误差。从图像出发整体估算大气校正参数可能更为有效。如只考虑单次散射且忽略大气吸收,则程辐射亮度值($L_{p\lambda}$)主要受大气层外平均太阳辐照度($E_{0\lambda}$)、散射率(ω)、散射角(δ)和散射相函数 $P(\delta)$ 影响,如公式(5)所示^[10];下行天空漫射光($E_{d\lambda}$)如公式(6)所示^[11]。其中, $\omega = 1 - T_{\varphi\lambda}$, $\delta = \pi - \theta$, 散射相函数 $P(\delta)$ 可用公式(7)近似表

达^[12]。

$$L_{p\lambda} = \frac{E_{0\lambda}\omega}{4\pi}P(\delta) \quad (5)$$

$$E_{d\lambda} = \frac{\omega E_{0\lambda}}{2} \quad (6)$$

$$P(\delta) = \frac{3(1 + \cos^2\delta)}{4} \quad (7)$$

根据暗目标减法,若不考虑暗目标反射率,则传感器定标后暗目标像元值即为程辐射亮度值($L_{p\lambda}$),用公式(5)和公式(7)即可求得($T_{\varphi\lambda}$)。再据传感器观测天顶角较小时($T_{\varphi\lambda}$)和($T_{\theta\lambda}$)与(τ_λ)的关系如公式(8)所示^[13],即可求得 $T_{\theta\lambda}$ 和 τ_λ 。但是正如 Chavez 等指出暗目标反射率并不等于零,由此估算的大气透过率还有一定的误差。

$$\begin{cases} T_{\varphi\lambda} = \exp(-\tau_\lambda \sec\varphi) \\ T_{\theta\lambda} = \exp(-\tau_\lambda \sec\theta) \end{cases} \quad (8)$$

为了估算暗目标反射率,可将公式(2),(3),(5),(6)带入公式(9)所示大气上界表观反射率(用 $\rho_{a\lambda}$ 表示)后^[1-2],可得公式(10)。令公式(10)右边第二项为程辐射反射率($\rho_{p\lambda}$),如公式(11)所示,则右边第一项为暗目标反射率。由此可得地表反射率($\rho_{g\lambda}$)的反演式(12),化简式(12)可得公式(13),即为更加简便的大气校正模型。用多次迭代法合理的确定程辐射反射率后,就能求得更准确的大气校正参数。

$$\rho_{a\lambda} = \frac{L_{i\lambda}\pi}{E_{0\lambda}\cos\theta} \quad (9)$$

$$\rho_{a\lambda} = \rho_{g\lambda}T_{\varphi\lambda}\left(T_{\theta\lambda} + \frac{\omega}{2\cos\theta}\right) + \frac{\omega P(\delta)}{4\cos\theta} \quad (10)$$

$$\rho_{p\lambda} = \frac{\omega P(\delta)}{4\cos\theta} \quad (11)$$

$$\rho_{g\lambda} = \frac{\rho_{a\lambda}\cos\theta - \rho_{p\lambda}\cos\theta}{T_{\varphi\lambda}\left(T_{\theta\lambda}\cos\theta + \frac{\omega}{2}\right)} \quad (12)$$

$$\rho_{g\lambda} = A\rho_{a\lambda} + B \quad (13)$$

4 CBERS - CCD 数据大气校正

4.1 传感器定标

传感器定标指建立探测元件输出信号数字量化值与对应像元地物辐射亮度值间定量关系的方法和过程。早期的 CBERS-CCD 数据没有提供定标系数,杨忠东和彭光雄等用交叉定标法获取^[17-48]。目前,多用中国资源卫星应用中心提供的定标模型及原始数据头文件中提供的定标系数完成。

4.2 大气校正实现

传感器定标后,用公式(10)反演表观反射率,消除太阳高度影响。首先,假设暗目标反射率为零,在

表观反射率图像上浓密植被阴影处均匀采样足够数量的暗目标, 求出暗目标表观反射率均值($\rho_{a\lambda-d}$), 即为程辐射反射率($\rho_{p\lambda}$)。再据公式(8)、公式(11—13), 初次估算大气校正参数如表 2 所示。其次, 用表 2 参数将表观反射率反演成地表反射率, 分别在表观反射率和地表反射率图像上, 初次采样暗目标附近光照浓密植被处采样, 求出对应均值($\rho_{a\lambda-v}$)和($\rho_{g\lambda-v}$)之差, 即是相对准确的程辐射反射率($\rho_{p\lambda}$)。再据公式(8)、公式(11—13), 再次估算大气校正参数, 依此经过多次迭代最终求得更准确的大气校正参数如表 3 所示。最后, 用表 3 参数完成研究区 CBERS—CCD 数据大气校正。

表 2 假设暗像元反射率为零获得大气校正参数

参数	波段				
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
$\rho_{a\lambda-d}$	0.060 562	0.051 404	0.072 042	0.051 664	0.053 565
$\rho_{p\lambda}$	0.060 562	0.051 404	0.072 042	0.051 664	0.053 565
ω_{λ}	0.141 419	0.120 034	0.168 226	0.120 641	0.125 080
$T_{\varphi\lambda}$	0.858 581	0.879 966	0.831 774	0.879 359	0.874 920
τ_{λ}	0.152 466	0.127 865	0.184 184	0.128 555	0.133 616
$T_{\theta\lambda}$	0.772 444	0.805 304	0.732 047	0.804 363	0.797 500
A_{λ}	1.305 455	1.253 012	1.374 801	1.254 468	1.265 165
B_{λ}	-0.079 061	-0.064 410	-0.099 043	-0.064 811	-0.067 769

注: $\rho_{a\lambda-d}$ ——暗目标表现反射率均值; $\rho_{p\lambda}$ ——程辐射反射率; ω_{λ} ——散射率; $T_{\varphi\lambda}$ ——观测方向大气透过率; τ_{λ} ——总的大气光学厚度; $T_{\theta\lambda}$ ——入射方向大气透过率; A_{λ} ——斜率; B_{λ} ——截距。下同。

4.3 校正效果评价

大气校正前后, 统计特征参数如表 4 所示, 对应图像上映秀镇至都江堰市直线距离间 NDVI 变化如图 1 所示^[19-20]。对比分析结果表明, 校正后图像整体亮度值增加, 对比度增强, 饱和度提高, 地物轮廓更清晰, 细节层次更分明, 已明显还原下垫面原貌, 图像目视效果更好。校正前因大气影响各波段最小值均大

于校正后图像, 校正后各波段值域、均值和标准差均大于校正前图像, 校正后图像信息量更丰富, 图像增强效果显著。虽校正前后 NDVI 变化趋势基本一致, 但校正后 NDVI 值域、均值和标准差均增大, NDVI 动态范围更大且校正后 NDVI 均比较校正前增加, 更能真实地反映地表覆盖状况。可见, 该模型方法已达到消除数据大气影响、增强图像信息的目的, 校正后图像能够满足植被生态监测等应用需要。

表 3 经过多次迭代获得大气校正参数

参数	波段				
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
$\rho_{a\lambda-v}$	0.072 194	0.078 144	0.086 188	0.169 516	0.062 457
$\rho_{g\lambda-v}$	0.014 703	0.034 084	0.019 900	0.148 882	0.010 976
$\rho_{p\lambda}$	0.057 491	0.044 060	0.065 716	0.020 634	0.051 481
ω_{λ}	0.134 248	0.102 885	0.153 454	0.048 183	0.120 214
$T_{\varphi\lambda}$	0.865 752	0.897 115	0.846 456	0.951 817	0.879 786
τ_{λ}	0.144 149	0.108 565	0.166 582	0.049 379	0.128 069
$T_{\theta\lambda}$	0.783 401	0.832 059	0.754 198	0.919 778	0.805 025
A_{λ}	1.287 593	1.212 701	1.336 221	1.093 741	1.253 442
B_{λ}	-0.074 025	-0.053 432	-0.087 811	-0.022 568	-0.064 528

注: $\rho_{a\lambda-v}$ ——植被表现反射率; $\rho_{g\lambda-v}$ ——植被地表反射率。

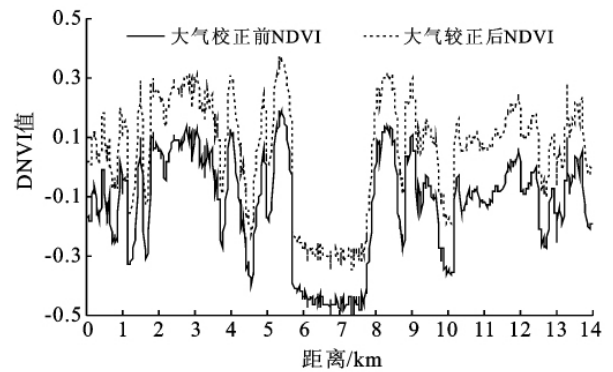


图 1 大气校正前后研究区两点间(映秀镇—都江堰) NDVI 比较

表 4 大气校正前后研究区图像统计特征比较

波段	大气校正前				大气校正后				
	最小值	最大值	均值	标准差	波段	最小值	最大值	均值	标准差
B ₁	0.060 3	0.299 9	0.027	0.180	B ₁	0.003 1	0.312 1	0.079	0.230
B ₂	0.046 9	0.277 5	0.040	0.200	B ₂	0.001 4	0.283 2	0.077	0.240
B ₃	0.068 5	0.301 7	0.032	0.170	B ₃	0.001 8	0.315 3	0.090	0.230
B ₄	0.027 0	0.038 5	0.110	0.400	B ₄	0.001 5	0.396 8	0.121	0.440
B ₅	0.058 3	0.288 5	0.024	0.180	B ₅	0.002 3	0.297 6	0.071	0.230
NDVI	-0.615 4	0.381 6	-0.067	1.500	NDVI	-0.483 7	0.531 1	0.117	1.620

5 结论

大气校正涉及太阳辐射与“气—地”系统间, 众

多复杂的相互作用过程和参数, 校正效果直接取决于校正模型及其参数精度。不同的模型方法的差别主要来源于对吸收气体的处理、地表特性假设和多次散

射算法的差异。吸收气体对宽波段遥感影响不大,但对高光谱遥感影响较大。地表非均匀时需要考虑邻近像元的漫反射作用,非朗伯时需要推断半球反射特性,但是这对单角度观测非常困难。参数估计精度主要受传感器定标精度、气溶胶和水汽等多变气体反演精度的影响。在观测天顶角和气溶胶光学厚度比较小时,不同模型间的大气校正效果差异不是很大,校正模型方法的选择主要看其是否有针对性,是否简便、实用。

本研究针对 CBERS—CCD 数据宽波段、单角度和较窄视场的特点,以汶川地震灾区四川省紫坪铺库区为例,建立起简化的大气校正模型,应用改进的基于图像估算参数的方法,经过多次迭代确定程辐射反射率、观测方向透过率和入射方向透过率等,模拟出以表观反射率为基础的新的大气校正参数 a 和 b 值,从而简便、快速地完成研究数据大气校正。通过比较校正前后图像的目视效果,以及各波段与 NDVI 的最大值、最小值、均值和标准差等,从定性与定量角度证实该模型方法已达到消除大气效应、增强图像信息的目的,校正后图像能满足植被生态监测等应用需要,且因所需参数较少,获取参数成本较低,特别适宜于历史数据校正等方面,具有较强的实用性和可推广性。但因人为影响暗目标选择等,实际应用时应当谨慎;且因邻近效应、二向性反射特性和地形效应等并未涉及,仍需后续研究。

[参 考 文 献]

- [1] Kaufman Y J. Solution of the equation of radiative transfer for remote sensing over nonuniform surface reflectivity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 81 (6): 4137-4147.
- [2] Chavez P S. Image-based atmospheric correction-revisited and improved [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, 62(9): 1025-1036.
- [3] LI Junsheng, ZHANG Bing, CHEN Zhengchao, et al. Atmospheric correction of CBERS—CCD images with MODIS data [J]. *Science in China (E): Technological Sciences*, 2006, 49(5): 149-158.
- [4] 易维宁,何超兰,乔延利,等. CBERS-02 卫星 CCD 图像的大气订正 [J]. *遥感学报* 2006, 10(5): 703-708.
- [5] 王中挺,陈良富,顾行发,等. CBERS-02 卫星数据大气校正的快速算法 [J]. *遥感学报* 2006, 10(5): 709-714.
- [6] 朱长明,杨辽,陈生,等. 基于 ATCOR2 模型的 CBERS-02 数据大气校正 [J]. *遥感技术与应用* 2008, 23(5): 565-570.
- [7] Ahern F J, Goodenough D C, Jain S C, et al. Use of clear lakes as standard reflectors for atmospheric measurements [R]. Ann Arbor, M I: Proceeding of the 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1977: 731-775.
- [8] 田庆久,郑兰芬,童庆禧. 基于遥感影像的大气辐射校正和反射率反演方法 [J]. *应用气象学报*, 1998, 9(4): 456-461.
- [9] WANG Zhongting, CHEN Liangfu, GONG Hui, et al. Modified DDV method of aerosol optical inversion over land surfaces from CBERS02B [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1047-1052.
- [10] Chavez P S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55(9): 1025-1036.
- [11] Kaufman Y J, Tanre D. Atmospheric resistant vegetation index for EOS-MODIS [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 261-270.
- [12] 刘小平,邓孺孺,彭晓娟. 基于 TM 影像的快速大气校正方法 [J]. *地理科学* 2005, 25(1): 87-93.
- [13] 齐志新,邓孺孺. 多暗像元大气校正方法 [J]. *国土资源遥感* 2007(2): 16-19.
- [14] Van Stokkom H T C, Guzzi R. Atmospheric spectral attenuation of airborne remote sensing data: Comparison between experimental approach [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1984, 5: 231-248.
- [15] Tanre D, Holben B N, Kaufman Y J. Atmospheric correction algorithm for NOAA-AVHRR products, theory and application [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 231-248.
- [16] d'Almeida G A, Koepfe P, Shettle E P. Atmospheric Aerosols: Global Climatology and Radiative Characteristics [M]. Hampton: A Deepak Pub., 1991.
- [17] 杨忠东,谷松岩,邱红,等. 中巴地球资源一号卫星 CCD 图像质量评价和交叉定标研究 [J]. *遥感学报*, 2004, 8(2): 113-120.
- [18] 彭光雄,何宇华,李京,等. 中巴地球资源 02 星 CCD 图像交叉定标与大气校正研究 [J]. *红外与毫米波学报* 2007, 26(1): 22-25.
- [19] 赵巧华,何金海. 基于资源卫星图像对 NDVI 进行大气修正的一种简单方法 [J]. *南京气象学院学报* 2003, 26(2): 236-242.
- [20] 程伟,王黎明,田庆久. 一种基于阴影像元的光学遥感大气校正方法 [J]. *测绘学报* 2008, 37(4): 469-475.