

几何校正对暗像元算法及离水辐亮度反演精度的影响:以太湖为例*

陈 军^{1,2}, 付 军^{1,2}, 孙记红^{1,2}

(1: 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071)

(2: 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘 要: 几何校正将引起几何校正前后像元的像素值发生变化, 进而导致暗像元的辐亮度在几何校正前后存在偏差. 本文以太湖为研究水区, 以 2003 年 10 月 28 日的 Landsat/TM 影像、2008 年 7 月 24 日的 CBERS 影像和 2009 年 4 月 25 日的 HJ-1B 影像作为数据基础, 研究与探讨了几何校正对暗像元大气校正算法以及离水辐亮度反演精度的影响. 通过本文的研究可知, 几何校正将引起 Landsat 数据、CBERS 数据和 HJ-1B 数据的暗像元辐亮度存在 0.2, 0.47 和 0.882 W/(m² · sr · μm) 的绝对偏差; 对于上述三景数据, 几何校正将引起 3.28% - 9.81% 的基于暗像元方法的气溶胶光学厚度估算偏差; 几何校正对基于 Landsat/TM 影像数据和 CBERS 影像数据的离水辐亮度反演精度影响相对较小, 其误差主要为 0 - 6%, 对基于 HJ-1B 卫星数据的离水辐亮度反演精度的影响相对较大, 其误差主要为 0 - 15%, 局部区域可达 40% 以上. 因此, 大气校正必须在几何校正之前进行处理.

关键词: 几何校正; 大气校正; 暗像元; 离水辐亮度; 太湖

Influences of geometric correction on the accuracy of dark pixel atmospheric correction algorithm and water leaving irradiance retrieval: a case study of Lake Taihu

CHEN Jun^{1,2}, FU Jun^{1,2} & SUN Jihong^{1,2}

(1: *The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Qingdao 266071, P. R. China*)

(2: *Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, P. R. China*)

Abstract: The pixel values would be different before and behind the geometric correction, which would lead to the different irradiance of dark pixel before and behind the geometric correction. Regarding the Lake Taihu as the study area and using the Landsat/TM, CBERS and HJ-1B satellite imageries, data collected at October 28, 2003, July 24, 2008 and April 25, 2009, respectively, as the data foundation, the paper researched and discussed the influences of geometric correction on the accuracy of dark pixel atmospheric correction algorithm and water leaving irradiance retrieval production. The results showed that the geometric correction would caused to 0.2, 0.47, 0.882 W/(m² · sr · μm) irradiance absolute deviations of dark pixel for Landsat/TM, CBERS and HJ-1B satellite imageries, respectively. There were 3.28% - 9.81% relative biases for aerosol optical thickness estimated from the dark pixel algorithm. The influences of geometric correction would be relatively smaller on the Landsat/TM and CBERS imageries (relative bias mainly about 0 - 6%), and relatively larger on the HJ-1B satellite imagery (relative bias mainly about 0 - 15%, and some regions up to 40%). As a result, it was well known that the atmospheric correction must be calculated before the geometric correction.

Keywords: Geometric correction; atmospheric correction; dark pixel; water leaving irradiance; Lake Taihu

由于受到各种因素的影响, 遥感影像在成像的过程中会产生几何畸变. 按引起误差的成因划分, 几何畸变误差可以分为内部误差和外部误差. 内部误差主要由 MSS 扫描速度不均、不同波段相同扫描线的成像时间差、扫描线的非线性和非平行性等传感器自身的不稳定性能导致的误差; 外部误差是由传感器的外方位(位置、姿态)变化、地球曲率、地球自传等传感器以外各种因素影响导致的误差^[1]. 几何校正可以分为针对

* 国家科技支撑计划十一五项目(2008BAC34B03)和中国海陆地质地球物理系列图项目(GZH200900504)联合资助.
2010-04-28 收稿; 2010-07-17 收修改稿. 陈军, 男, 1982 年生, 实习研究员; E-mail: chenjun820711@163.com.

引起几何畸变的几何粗校正和利用地面控制点的几何精校正. 在几何校正过程中, 不仅像元的坐标发生变化, 而且其灰度值也将发生变化. 为了确定图像上各像素点的灰度值, 必须对原始图像进行重采样^[2]. 像元在重采样的过程中, 像元像素值进行了重新组合, 因此, 几何校正后影像的像素值和几何校正前的像素值之间存在很大的差异.

对于水色遥感而言, 卫星所探测到的遥感信号分为载有水体水质浓度信息的离水辐亮度和大气噪声的程辐射信息. 大气校正主要是从总信号中提取离水辐亮度信号, 大气校正的难点在于从总信号中提取弱信号. 通常情况下, 蓝光波段 80% 以上的信息来自于大气散射的贡献, 离水辐亮度信号仅占总信号的 10% 左右, 而这个比重在绿光波段将更小^[3]. 大气校正的另一难点则是, 辐射定标和大气校正的 5% 误差, 可以导致 100% 以上的水质参数浓度的反演误差, 而不同的大气算法之间可能存在 2% - 4% 的误差^[4]. 大气散射可以分为 Rayleigh 散射和气溶胶散射. 大气固有成分的浓度具有较稳定的时空分布特性, 该类型的散射贡献可以通过多次散射加偏振的精确 Rayleigh 散射的方法予以消除^[5]. 然而, 气溶胶浓度及类型具有极大的地域多样性与时空不稳定性, 要准确计算气溶胶散射的贡献较难. 因此, 目前对大气校正算法的研究也主要侧重于对气溶胶散射贡献计算方法的探讨.

传统的暗像元大气校正算法认为^[6], 研究区域内存在清洁水体, 该水体在红外与近红外波段的光谱反射率近似等于 0. 然而在几何校正过程中, 像元像素将被重采样, 这将引起几何校正前后的暗像元灰度值发生了变化, 进而导致暗像元大气校正误差中包含部分因几何校正而引起的偏差. 鉴于此, 本研究从几何校正的机理出发, 以太湖为研究区域, 以 Landsat/TM、CBERS 和 HJ-1B 卫星遥感影像为数据基础, 研究并探讨了几何校正对暗像元大气校正算法及离水辐亮度反演精度的影响.

1 研究数据与研究区域

太湖 (30°55'40"-31°32'58"N, 119°52'32"-120°36'10"E) 又名震湖, 位于长江三角洲, 平均水深约为 1.89m, 湖体面积约为 2338km², 是典型的二类水体研究对象.

重复实验是检验理论模型真实性和可靠性的有效方法. 鉴于此, 本研究搜集了天气条件较好, 影像质量较高的三景不同传感器, 不同成像时间的太湖卫星影像数据, 并以此数据为基础, 开展几何校正对暗像元大气校正算法及离水辐亮度反演精度的影响研究. 三景卫星影像分别为: 2003 年 10 月 28 日的 Landsat/TM 影像、2008 年 7 月 24 日的 CBERS 影像和 2009 年 4 月 25 日的 HJ-1B 影像.

2 研究方法

2.1 几何校正

影响遥感图像几何变形的因素较多且复杂, 其变形规律难以用严格的数学函数加以描述. 通常情况下, 采用适当的多项式来近似地描述几何纠正前后相应点的坐标关系, 并利用控制点的图像坐标和参考坐标系中理论坐标利用最小二乘法原理解出多项式中的系数, 然后以此多项式对遥感图像进行几何校正^[1]. 假设几何校正前像元的坐标为 (x, y) 以及几何校正后的像元的坐标为 (X, Y) , 则近似的二元二次多项式几何校正方法可用下式表示:

$$X = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 \quad (1)$$

$$Y = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + b_{11}xy + b_{20}x^2 + b_{02}y^2 \quad (2)$$

在遥感影像的几何校正过程中, 计算得到的影像坐标多数不在原始影像的像元中心点, 且部分像元格网发生了扭曲变形, 因此必须对几何校正后的影像进行重采样成新规则格网数据, 这也是主流遥感影像处理软件的几何校正所采用的处理模式. 本研究主要采用双线性插值函数作为像素重采样算法. 假设待插值的影像坐标为 (x, y) ; 与其相邻的 4 个像点的坐标分别为 (i, j) , $(i, j+1)$, $(i+1, j)$ 和 $(i+1, j+1)$; α, β 分别为待求点在由四个像点所构成的格网中的定比分点; $f(x, y)$, $f(i, j)$, $f(i, j+1)$, $f(i+1, j)$ 和 $f(i+1, j+1)$ 分别为四个像点的像素值 (图 1). 则由双线性插值方法可得 $f(x, y)$ 如下:

$$f(i, j + \alpha) = \alpha f(i, j + 1) + (1 - \alpha) f(i, j) \quad (3)$$

$$f(i+1, j+\alpha) = \alpha f(i+1, j+1) + (1-\alpha)f(i+1, j) \quad (4)$$

$$f(x, y) = \beta f(i, j+\alpha) + (1-\beta)f(i+1, j+\alpha) \quad (5)$$

2.2 几何校正对气溶胶光学厚度估算的影响

由误差传递原理可知：假设变量 x 存在误差 δx ，当变量 x 经过作用函数 f 变换后，转化为变量 y ；假设变量 y 因 x 存在误差而引起的偏差为 δy ， δy 与 δx 的近似关系如下：

$$\delta y \approx f'(x) \delta x \quad (6)$$

由标准 Gordon 暗像元大气校正算法可知，若研究区域内存在清澈水体，则该研究区域的气溶胶光学厚度可以用下式估算而得^[7]：

$$\tau_a = \frac{4\pi L_D(\lambda) - \tau_r F_0' P_r(\theta_z)}{0.97 F_0' P_a(\theta_z)} \quad (7)$$

式中， $\tau_a(\lambda)$ 为气溶胶光学厚度； $L_D(\lambda)$ 为暗像元辐亮度； $\tau_r(\lambda)$ 为 Rayleigh 散射光学厚度； $P_r(\theta_z)$ 为 Rayleigh 散射相函数； $P_a(\theta_z)$ 为气溶胶散射相函数； λ 为波长； F_0' 为经过臭氧双带吸收的大气层外太阳辐射照度； θ_z 为太阳高度角。

将(7)式代入(6)式可得暗像元误差对大气气溶胶光学厚度估算精度的影响：

$$\delta \tau_a = \frac{\delta L_D(\lambda)}{L_a(\lambda)} \quad (8)$$

由此可得因几何校正引起的气溶胶光学厚度估算精度的相对误差为：

$$\frac{\delta \tau_a}{\tau_a} = \frac{4\pi}{4\pi L_D(\lambda) - \tau_r F_0' P_r(\theta_z)} \delta L_D(\lambda) \times 100\% \quad (9)$$

2.3 几何校正对离水辐亮度反演精度的影响

根据 Gordon 的标准暗像元算法，假设天空辐照度各向同性，天空晴朗无云，水体为朗伯体，忽略大气的偏振、湍流、折射和多次散射的作用，卫星传感器在大气层顶处接收到的总信号用辐亮度表示如下^[8-9]：

$$L_t(\lambda) = L_{rs}(\lambda) + L_{as}(\lambda) + T(\lambda)L_{wc}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda) \quad (10)$$

式中， λ 为波长； $L_t(\lambda)$ 为水体离水辐亮度； $L_{rs}(\lambda)$ 为大气分子的 Rayleigh 散射； $L_{as}(\lambda)$ 为大气成分的气溶胶散射； $L_{wc}(\lambda)$ 为太阳耀斑； $t(\lambda)$ 为大气漫射透过率； $T(\lambda)$ 为太阳直射透过率。在水色遥感中，设计传感器观测角度时，已经考虑了太阳耀斑的作用，并予以规避，太阳耀斑对总信号的影响可以忽略不计^[10]。因此，式(10)可以简化为：

$$L_t(\lambda) = L_{rs}(\lambda) + L_{as}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda) \quad (11)$$

结合(6)式的误差传递原理，则离水辐亮度因气溶胶散射估算误差引起的偏差可以表示为：

$$\delta L_w(\lambda) = \frac{-L'_{as}(\lambda)t(\lambda) - [L_t(\lambda) - L_{rs}(\lambda) - L_{as}(\lambda)]t'(\lambda)}{t^2(\lambda)} \delta \tau_a \quad (12)$$

对应的相对误差表达式为：

$$\frac{\delta L_w(\lambda)}{L_w(\lambda)} = \frac{-L'_{as}(\lambda)t(\lambda) - [L_t(\lambda) - L_{rs}(\lambda) - L_{as}(\lambda)]t'(\lambda)}{t(\lambda)[L_t(\lambda) - L_{rs}(\lambda) - L_{as}(\lambda)]} \delta \tau_a \times 100\% \quad (13)$$

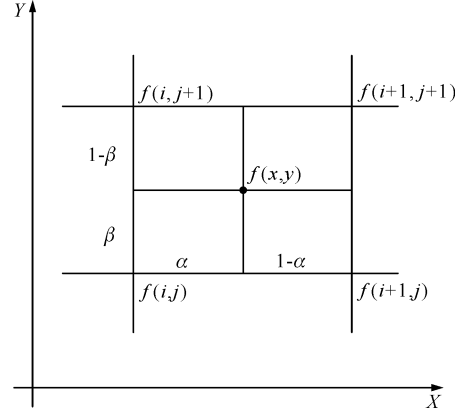


图1 双线性插值重采样

Fig.1 Bilinear resampling approach

3 实例计算

3.1 几何校正对气溶胶光学厚度的影响

标准暗像元大气校正算法认为:清洁水体的反射率在近红外与红外波段近似等于零^[8-9]. 鉴于暗像元的这种光谱特征,本研究的实例计算主要针对 Landsat/TM 卫星、CBERS 卫星和 HJ-1B 卫星的近红外波段遥感影像. 本研究的数据处理均在 ENVI4.4 软件平台下进行,数据处理流程如图 2 所示.

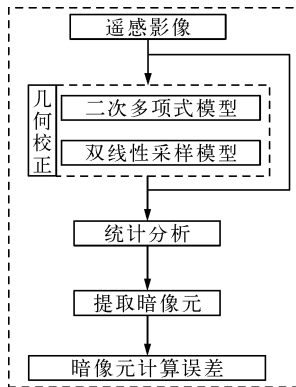


图 2 暗像元计算误差

Fig. 2 Calculating errors of dark pixel

张民伟的研究表明^[5],在太湖水区总是能找到适用于暗像元大气校正算法的清澈水体. 本研究在 ENVI 4.4 平台下,分别针对 2003 年 10 月 28 日的 Landsat/TM 影像、2008 年 7 月 24 日的 CBERS 影像和 2009 年 4 月 25 日的 HJ-1B 影像的第 4 波段数据,利用如图 2 所示的数据处理流程,分别提取几何校正前和几何校正后遥感影像中的暗像元. 其中暗像元的提取方法如下:①在 ENVI 4.4 平台下对遥感影像进行水陆分离;②统计像元 DN 值的分布直方图;③考虑到传感器成像过程中坏点的存在,并结合实践经验,在选择暗像元时,最小 DN 值对应的统计频数大于 2,则以该 DN 值对应的像元作为暗像元,否则以次最小 DN 值对应的像元作为暗像元.

表 1 为 Landsat 卫星、CBERS 卫星和 HJ-1B 卫星遥感影像的第 4 波段数据经过图 2 数据处理流程处理得到的结果. 几何校正将引起 2003 年 10 月 28 日的 Landsat/TM 影像、2008 年 7 月 24 日的 CBERS 影像和 2009 年 4 月 25 日的 HJ-1B 影像的暗像元辐亮度存在 0.2, 0.47 和 0.882W/(m²·sr·μm)的绝对偏差,折算成相对误差分别为 2.54%, 7.15%, 4.90% (表 1). 利用表 1 结合(8)式和(9)式可以计算得到几何校正误差对基于标准 Gordon 暗像元算法的气溶胶光学厚度估算精度的影响,计算结果表明,对于三种不同的传感器,几何校正将引起 3.28% - 9.81% 的气溶胶光学厚度估算偏差(表 1).

表 1 几何校正对暗像元辐亮度的影响

Tab. 1 The influence of geometric correction on estimating the radiance of dark pixels

传感器	辐亮度(校正前)	辐亮度(校正后)	辐亮度绝对误差	辐亮度相对误差(%)
Landsat/TM4	7.689	7.889	0.200	2.54
CBERS/CCD-4	6.110	6.580	0.470	7.15
HJ-B/CCD-4	14.528	15.276	0.882	4.90

表 2 几何校正对气溶胶光学厚度精度的影响

Tab. 2 The influence of geometric correction on estimating accuracy of aerosol optical depth

传感器	辐亮度绝对误差	气溶胶光学厚度绝对误差	气溶胶光学厚度相对误差(%)
Landsat/TM4	0.200	0.020	3.28
CBERS/CCD-4	0.470	0.048	9.81
HJ-1B/CCD-4	0.882	0.090	6.54

3.2 几何校正对离水辐亮度反演精度的影响

由式(13)结合表 1 和表 2 的分析结果,在 ENVI 4.4 平台下对 2003 年 10 月 28 日的 Landsat/TM 卫星、2008 年 7 月 24 日的 CBERS 卫星和 2009 年 4 月 25 日的 HJ-1B 卫星的近红外波段遥感影像数据进行分析与处理,可以得到各个卫星所对应近红外波段遥感影像的离水辐亮度反演精度状况. 几何校正对三景卫星影像离水辐亮度反演精度影响状况表明,几何校正对基于 Landsat/TM 影像数据和 CBERS 影像数据的离水辐亮度反演精度影响相对较小,其误差主要为 0 - 6%;对基于 HJ-1B 卫星数据的离水辐亮度反演精度的影响相

对较大,其误差主要为 0 - 15%,局部区域可达 40% 以上(图 3). 受水色信号过弱条件的限制,30% 的水质浓度反演精度是水色遥感技术可获取却难以克服的技术门槛^[11]. 很显然,几何校正引起的离水辐亮度反演偏差,在某些情况不利于水质浓度反演精度的提高,这就要求大气校正必须在几何校正之前进行处理.

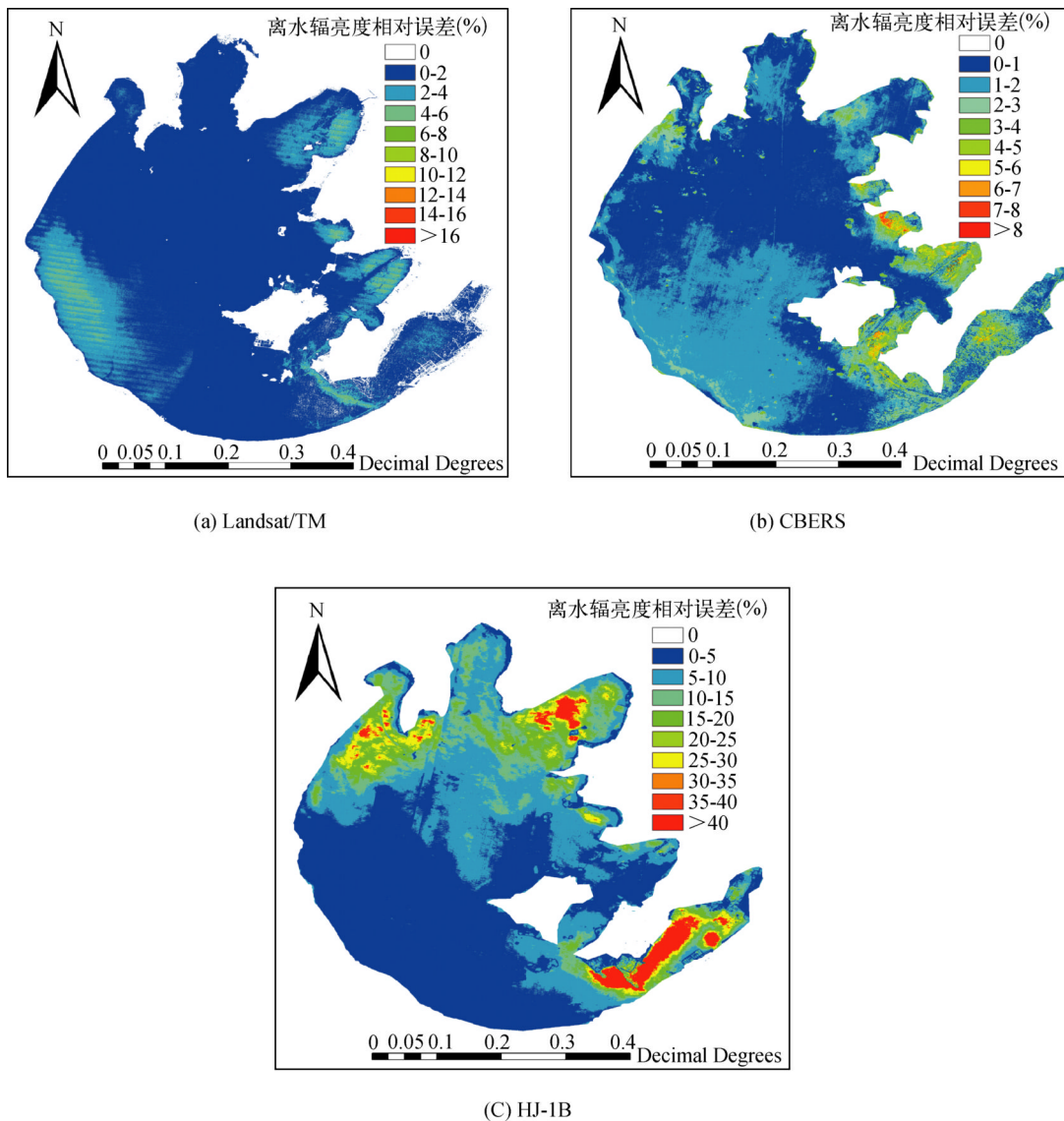


图 3 几何校正对离水辐亮度反演精度的影响

Fig. 3 The influence of geometric correction on estimating accuracy of water-leaving radiance

4 结论

在遥感影像几何校正过程中,不仅像元坐标发生了变化,而且像元像素值发生了变化. 标准 Gordon 暗像元大气校正算法以研究水区清澈水体的离水辐亮度作为输入参数,实现对研究区域气溶胶光学厚度的估算. 然而,几何校正将引起校正前后像元的像素值的差异,这将必然导致暗像元的辐亮度信息在几何校正前后存在偏差. 根据误差传递原理可知,这种偏差将随着遥感图像数据处理而被传播到各种数据产品中. 鉴于

此,本文以太湖水区为研究区域,以2003年10月28日的Landsat/TM影像、2008年7月24日的CBERS影像和2009年4月25日的HJ-1B影像作为数据基础,分别研究与探讨了几何校正对暗像元大气校正算法以及离水辐亮度反演精度的影响.通过本文的研究可以得到如下几点结论:

(1) 几何校正将引起Landsat卫星、CBERS卫星和HJ-1B卫星遥感影像数据的暗像元辐亮度存在0.2, 0.47和0.882 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 的绝对偏差,折算成相对误差分别为2.54%,7.15%,4.90%.

(2) 以几何校正前和几何校正后的暗像元辐亮度作为标准Gordon暗像元大气校正算法的输入参数,对比两者的差异可知,几何校正将引起Landsat卫星、CBERS卫星和HJ-1B卫星遥感影像数据的3.28% - 9.81%气溶胶光学厚度估算偏差.

(3) 就本研究的实例数据而言,几何校正对不同传感器,不同成像时间的近红外波段离水辐亮度反演精度的影响不同.几何校正对基于Landsat/TM影像数据和CBERS影像数据的离水辐亮度反演精度影响相对较小,其误差主要为0-6%;几何校正对基于HJ-1B卫星数据的离水辐亮度反演精度的影响相对较大,其误差主要为0-15%,局部区域可达40%以上.

综上所述,几何校正对暗像元大气校正算法及离水辐亮度反演精度的影响较大,这就要求大气校正必须在几何校正之前进行处理.

5 参考文献

- [1] 张发存,王忠,赵晓红等. 遥感卫星图像几何粗校正的数据并行方法研究. 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1200-1206.
- [2] 柳强,张根耀,赵宗掬. 遥感图像的几何畸变校正方法研究. 计算机工程与应用, 2003, 13: 52-54.
- [3] Chomko RM, Gordon HR. Atmospheric correction of ocean color imagery: using of the Junge power-law aerosol size distribution with variable refractive index to handle aerosol absorption. *Applied Optics*, 1998, 37(24): 5560-5572.
- [4] Ding KY, Gordon HR. Atmospheric correction of ocean-color sensors; effects of the earth's curvature. *Applied Optics*, 1994, 33(30): 7096-7106.
- [5] 张民伟,唐军武,丁静. 水色大气校正算法综述. 海洋技术, 2008, 27(3): 110-126.
- [6] Pan DL, Mao ZH. Atmospheric correction for China's coastal water color remote sensing. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(3): 343-354.
- [7] 陈军,孙记红,付军. 基于分区暗像元和Spline插值方法估算太湖气溶胶光学厚度. 遥感信息, 2011(待刊).
- [8] Hu CM, Carder KL, Muller-Karger FE. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery: assessment of the use of alternative bands. *Applied Optics*, 2000, 39(21): 3573-3581.
- [9] Gordon HR, Clark DK. Clear water radiance for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery. *Applied Optics*, 1981, 20(24): 4175-4180.
- [10] Gordon HR, Wang W. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, 1994, 33(3): 443-452.
- [11] Shafique NA, Autrey BC, Fulk F *et al.* Hyperspectral narrow wavebands selection for optimizing water quality monitoring on the Great Miami River, Ohio. *Journal of Spatial Hydrology*, 2001, 1(1): 1-22.