

## MODIS 影像的大气校正及在太湖蓝藻监测中的应用\*

李国砚<sup>1,2</sup>, 张仲元<sup>3</sup>, 郑艳芬<sup>4</sup>, 刘晓玫<sup>1</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

(4: 中国环境管理干部学院, 秦皇岛 066004)

**摘 要:** MODIS 数据有免费、波段丰富、时间分辨率高等优点, 是进行太湖蓝藻监测的重要数据源, 由于 MODIS 传感器接收的是地物反射太阳辐射的信号, 太阳辐射与地球大气的相互作用会引起传感器接收到的信号失真, 为了提高利用 MODIS 数据监测太湖蓝藻的精度, 必须对其进行大气校正. 本文介绍了 FLAASH 大气校正模型的基本原理, 并对 2007 年 4 月 25 日 MODIS 数据的前七个波段进行试验, 对比分析了影像大气校正前后的 NDVI 值以检测大气校正的效果; 分析表明, 大气校正前后 NDVI 的变化趋势基本上相同, 但大气校正后的 NDVI 动态范围更大, 校正后 NDVI 的平均值和标准差增大, 大气校正在一定程度上有效地降低了大气对遥感影像的影响, 达到了增强信息的目的; 最后, 利用大气校正获取的地表真实反射率数据的第二波段与第一波段的比值, 运用阈值法提取蓝藻信息, 经试验当阈值为 1.9 时提取出来的蓝藻分布图基本上与实际相符. 利用 MODIS 影像可以快速、及时地监测蓝藻爆发的位置及爆发程度.

**关键词:** MODIS; 大气校正; FLAASH; 蓝藻

## Atmospheric correction of MODIS and its application in cyanobacteria bloom monitoring in Lake Taihu

LI Guoyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhongyuan<sup>3</sup>, ZHENG Yanfen<sup>4</sup> & LIU Xiaomei<sup>1</sup>

(1: *Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(3: *College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, P.R.China*)

(4: *Environment Management College of China, Qinhuangdao 066004, P.R.China*)

**Abstract:** MODIS, a good remote sensing image data source, is suitable to monitor cyanobacteria bloom for its free and high time resolution, however, MODIS sensor receives distorting signals, due to the interaction between solar radiation and atmosphere, and atmospheric correction is necessary to acquire true surface reflectance and improve the accuracy of monitoring cyanobacteria bloom. In this paper, the basic theory of FLAASH atmosphere correction model attached in ENVI software, which derives from the MODTRAN 4 radiative transfer code, was introduced and explained. Then the FLAASH code was used to process MODIS data, and the NDVI after atmospheric correction was compared with that before correction. Results indicated that atmosphere's influences were reduced and useful information was enhanced. In the end, the ratio between Band2 and Band1 which was obtained by FLAASH atmospheric correction, was used to extract the cyanobacteria bloom information with the threshold.

**Keywords:** MODIS; atmospheric correction; FLAASH; cyanobacteria bloom

MODIS(中分辨率成像光谱仪) 是新一代地球观测传感器, 搭载于 NASA 的地球观测系统(EOS) TERRA 和 AQUA 两颗卫星之上, 其数据在全世界范围都可免费接收. MODIS 影像有覆盖可见光、近红外和远红

\* 中国科学院“优秀博士论文、院长奖获得者科研启动专项资金”、国家自然科学基金(2007BAC26B01)和江苏省自然科学基金(BK2007261)联合资助. 2007-08-30 收稿; 2007-11-06 收修稿. 李国砚, 男, 1981 年生, 硕士研究生; E-mail: ligy26@163.com.

外的 36 个波段的数据, 光谱范围在 0.4–14.4 $\mu\text{m}$  之间, 扫描宽度 2330km, 其中前两个波段的分辨率率为 250m, 3–7 波段的分辨率率为 500m, 8–36 波段的分辨率率为 1000m, 每天分别过境两次, 由于其时间分辨率较高, 在一定程度上弥补了其空间分辨率的不足<sup>[1]</sup>. 因此, MODIS 数据在监测自然灾害、生态环境、全球变化等方面具有良好的应用前景<sup>[2]</sup>.

从 2007 年 3 月底起, 太湖蓝藻水华开始暴发, 特别是从 5 月份开始大规模暴发, 使无锡市的饮用水源地受到污染, 给人民的日常生活带来了不利影响, 因而运用遥感技术动态监测蓝藻暴发程度, 进而采取措施减少蓝藻暴发带来的不利影响已经成为备受关注的问题. MODIS 由于其免费、波段丰富、时间分辨率高等优点, 成为用来进行蓝藻监测的重要数据源. 但是由于 MODIS 卫星传感器接收的是地物反射太阳辐射的信号, 在太阳辐射与地球大气的相互作用中, 会产生吸收、反射、散射与发射等效应, 这些都会引起传感器接收到的信号失真, 使图像质量下降<sup>[3]</sup>, 特别是水体, 其反射光谱信号相对陆地较弱<sup>[4]</sup>, 因此大气的影响对监测太湖蓝藻的影响更明显. 使我们直接利用 MODIS 数据的 DN 值来监测蓝藻的精度下降, 尤其是随着定量遥感的快速发展, 如何消除大气对遥感数据的影响、还原目标物的真实反射率成为众多研究者研究的对象<sup>[5]</sup>.

国内外的众多学者提出了很多大气校正模型<sup>[3–8]</sup>, 如: 直方图均衡化法(Histogram Matching Method)、经验线性法(Empirical Line Method)、暗目标法(Dark Object Method)、6S、MODTRAN 大气校正模式等. 6S 和 MODTRAN 是基于大气传输模型建立起来的校正模型, 精度高, 但需要输入的参数较多; 而直方图均衡化法、经验线性法等模型虽相对比较简单, 但却是建立在特定或理想的条件下, 故校正的精度不高, 实用性受到一定的限制. 本文用以 MODTRAN4 大气辐射传输模型为基础的 FLAASH 大气校正模型对 MODIS 数据进行大气校正, 通过对大气校正前后 NDVI 的对比分析来检测大气校正的效果, 并用大气校正后获取的地表真实反射率数据提取蓝藻.

## 1 FLAASH 大气校正基本原理

FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)是由光谱科技公司(Spectral Sciences Inc)和空气动力研究实验室(Air Force Research Laboratory)共同研制开发的<sup>[7–9]</sup>, 是基于 MODTRAN4 的大气校正模块, 它集成在 ENVI 遥感处理软件中, 能对 400–2500nm 波长范围内的遥感影像进行大气校正. 直接获取影像获取时的大气状况是不现实的, 因此 FLAASH 模型不是在预先计算好的模型数据库中加入辐射传输参数来进行大气校正, 而是直接结合 MODTRAN4 的大气辐射传输源码, 通过大气在高光谱像素上的特征来估计大气的属性, 进而为每一幅影像生成一个唯一的 MODTRAN 解决方案, 同时, 标准的 MODTRAN 大气模型和气溶胶类型也可被直接使用. FLAASH 模块还可以纠正邻域效应, 计算整幅影像的大气能见度, 对光谱进行平滑、消噪等, 能对 Landsat、SPOT、AVHRR、ASTER、MODIS、MERIS、AATSR、IRS 等多光谱和高光谱数据进行大气校正<sup>[8–9]</sup>.

FLAASH 模型是在 MODTRAN 模型的基础上发展起来的, 其大气纠正基于传感器处单个像素点接收到的太阳波谱范围内(不包括热辐射)标准的平面朗伯体(或近似平面朗伯体)反射的光谱辐射亮度, 光谱辐射亮度计算公式如下<sup>[8–9]</sup>:

$$L = A\rho/(1-\rho_e S) + B\rho_e/(1-\rho_e S) + La \quad (1)$$

其中,  $L$  为传感器处单个像素点接收到的辐射亮度;  $\rho$  为该像素点的地表反射率;  $\rho_e$  为该像素点及其周边区域的平均地表反射率;  $S$  为大气球面反照率;  $La$  为大气后散射的辐射亮度;  $A$ 、 $B$  是基于大气和几何条件的系数, 与地表反射率无关. 该公式中所有的变量都与波长有关, 为了简化公式, 公式(1)中省略了波长指数.

FLAASH模型中认为传感器接收到的辐射亮度由三部分组成<sup>[8–9]</sup>, 第一部分是太阳辐射经过大气照射到地表, 然后经地表反射再经过大气而进入到传感器的一部分, 即公式(1)中的 $A\rho/(1-\rho_e S)$ 部分; 第二部分是大气散射的一部分散射光经地表反射后进入到传感器中的部分, 即公式(1)中的 $B\rho_e/(1-\rho_e S)$ 部分; 第三部分为 $La$ , 即太阳辐射经大气散射后的一部分散射光直接经过大气而进入传感器的部分.

$A$ 、 $B$ 、 $S$  和  $La$  通过 MODTRAN 辐射传输模型的计算获得<sup>[7–9]</sup>, 它们的值由卫星观测的角度、太阳的角度、地表平均海拔高程、大气模型、气溶胶模型及能见度决定, 这些参数都可以通过其他方式或者利

用标准的大气模式和气溶胶模式获取;  $A$ 、 $B$ 、 $S$  和  $L_a$  还与大气中的水蒸气含量及气溶胶光学厚度值有着密切的关系, FLAASH 中利用暗目标法反演出气溶胶光学厚度, 而水蒸气含量是利用 MODTRAN 4 模拟大气吸收并形成查找表(look-up-tables), 然后利用查找表逐像元估算出来的;  $\rho$  与  $\rho_e$  的区别在于大气散射引起的邻域效应, 如果使  $\rho = \rho_e$ , 那么校正的过程中将会忽略邻域效应, 但在有薄雾或地表存在强烈对比的条件下会使短波波段范围内的大气校正存在明显的误差, FLAASH 中利用大气点扩散函数(Point-Spread Function)对邻域效应进行了纠正, 主要是利用下面这个公式估算  $\rho_e$ :

$$L_e \approx \left( \frac{(A+B)\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + L_a \quad (2)$$

式中,  $L_e$  为某像素及其周围像素的空间平均值, 可以通过原始影像计算得到。

当所有参数都获得之后, 就可以利用公式(1)和(2)逐个像元地求出整幅影像的真实地表反射率。

## 2 大气校正过程

### 2.1 辐射亮度的计算

辐射亮度的获得是计算地表反射率的前提条件, 遥感影像一般都是用DN值来表示, 为了计算地表真实反射率必须把DN值转换为辐射亮度. 遥感影像一般都经过了卫星发射之前的辐射定标、运行中的星上辐射定标及替代(场地)辐射定标的处理<sup>[10]</sup>, 辐射定标后会给出一个DN值转换辐射亮度L的辐射校正公式及相应的辐射校正参数, 这样就可以计算出辐射亮度. MODIS数据的辐射校正公式如下<sup>[11]</sup>:

$$L_B = \text{scales}_B(DN_B - \text{offsets}_B) \quad (3)$$

式中:  $B$  是该波段的序号; scales, offsets 分别是该波段的定标增益和定标偏移量;  $L$  是该波段的辐射亮度值;  $DN$  是该波段的灰度值。

对 MODIS 影像而言, 不同影像不同波段的辐射校正参数 scales 和 offsets 是不同的. 本文所用的实验数据为 2007 年 4 月 25 日 TERRA 影像数据, 其前七个波段的辐射校正参数见表 1.

表 1 2007 年 4 月 25 日 TERRA 卫星前七个波段的辐射校正参数(W/(m<sup>2</sup>·μm·sr))

波段	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band6	Band7
scales	0.02677798	0.01037380	0.02390079	0.01942374	0.00515574	0.00251485	0.00077121
offsets	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000

### 2.2 大气校正参数的输入

FLAASH 大气校正中需要输入的参数有: 太阳高度角、方位角、传感器类型、传感高度、影像获取的日期及具体时刻(格林尼治标准时间)、影像像元的大小、区域的平均海拔高程、区域的能见度、大气模型、气溶胶模型、影像区域中心的经纬度等, 对于本次大气校正实验数据的输入参数见表 2, 成像日期、成像时刻可以在 MODIS L1B 影像上直接获得, 传感器类型、传感器高度及影像像元的大小可以通过查看传感器参数获得, 太阳高度角和太阳方位角可以通过 MOD03 级数据获得, 海拔高程通过查询太湖地区 1:50000DEM 获得, 大气模式和气溶胶类型因缺乏实测数据而选择标准的模式, 中心经纬度通过几何校正后的影像获得, 能见度选择太湖地区的天气较好情况下能见度, 而在 FLAASH 模型中只有当反演气溶胶光学厚度不可用时才利用这个初始的大气能见度, 反演气溶胶光学厚度时可求出影像所在区域的平均大气能见度<sup>[9]</sup>, 本次大气校正实验反演出的平均大气能见度是 6.247KM.

表 2 FLAASH 大气校正的基本输入参数

参数	值	参数	值	参数	值
成像日期	2007-04-25	成像时刻	03: 13: 00	传感器类型	TERRA
传感器高度	705km	太阳高度角	69.84	太阳方位角	152.47
海拔高程	5m	能见度	25km	大气模式	中纬度夏季
气溶胶类型	城市类型	中心经度	120.0278	中心纬度	31.0317

因计算出来的 MODIS 辐射亮度的单位是  $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ , 而 FLAASH 大气校正需要输入数据的单位是  $\mu W/(cm^2 \cdot nm \cdot sr)$ , 因此在对 MODIS 数据进行大气校正时输入数据的比例系数是 10.

2.3 大气校正

本文研究区为太湖地区, 在东经  $119^{\circ}0'45''-120^{\circ}8'48''$ 、北纬  $30^{\circ}4'27''-31^{\circ}3'1''$  之间, 所用的实验数据为 2007 年 4 月 25 日 MODIS 数据的前 7 个波段, 其波长范围及空间分辨率见表 3. MODIS 数据的处理流程如图 1 所示, 大气校正前后的假彩色合成图见图 2.

表 3 MODIS 影像前七个波段的波长范围及空间分辨率  
Tab.3 The wavelengths and spatial resolution of MODIS first seven bands

波段	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band6	Band7
波长范围( $\mu m$ )	0.620-0.670	0.841-0.876	0.459-0.479	0.545-0.565	1.230-1.250	1.628-1.652	2.105-2.155
分辨率(m)	250	250	500	500	500	500	500

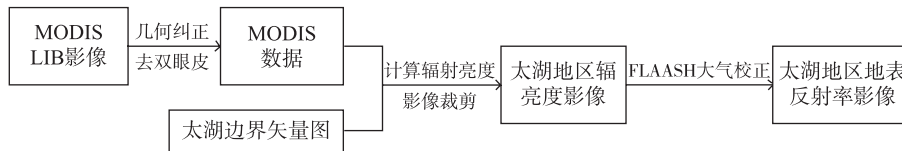


图 1 MODIS 大气校正流程图  
Fig.1 Process of MODIS atmospheric correction

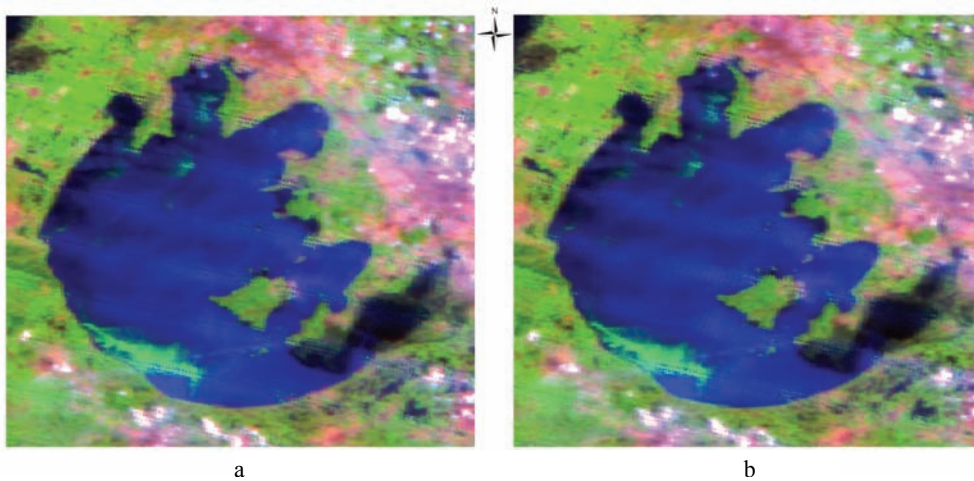


图 2 MODIS 影像大气校正前后彩色合成图 (a)大气校正前; (b)大气校正后  
Fig.2 Pseudo-color synthetic of MODIS before and after atmospheric correction  
(a) before atmospheric correction; (b) after atmospheric correction

2.4 结果分析

大气校正前后 MODIS 数据 7、2、1 波段(第 7 波段重采样到 250m 空间分辨率)的假彩色合成图(图 2)表明, 校正前后的图像的视觉变化不明显, 在对校正前后的图像进行叠加显示时发现校正后的图像对比度有所增强, 但并不像预期的那样图像对比度有明显增加、亮度有所提高<sup>[3]</sup>, 这是因为这幅影像的质量较好, 几乎没有云, 大气校正前的影像原本视觉效果就较好, 因此用目视的方法并不能准确地评价本次大气校正的效果, 为了评价和验证 FLAASH 模型对 MODIS 数据大气校正的效果, 对校正前后的归一化植被指数 NDVI 的变化进行了比较, 因植被指数是定量遥感中常用的变量, 许多遥感模型和以遥感信息为驱动变量的生态学模型都需要植被指数的参与<sup>[12]</sup>, 阿布都瓦斯提等利用 6S 模型并借用同步气象数据

对 ETM 数据进行的大气校正研究及彭光雄等对中巴地球资源 02 星 CCD 数据的大气校正研究也都表明利用 NDVI 能检测大气校正的效果<sup>[12-13]</sup>, MODIS 影像大气校正前后某一剖面的 NDVI 值(图 3). 大气校正前后 NDVI 的计算公式如下:

$$NDVI_{前}=(DN_{NIR}-DN_{red})/(DN_{NIR}+DN_{red}) \quad (3)$$

$$NDVI_{后}=(\rho_{NIR}-\rho_{red})/(\rho_{NIR}+\rho_{red}) \quad (4)$$

式中,  $DN_{NIR}$  和  $DN_{red}$  分别表示未进行大气校正前 MODIS 遥感影像近红外波段和红波段的 DN 值,  $\rho_{NIR}$  和  $\rho_{red}$  表示大气校正后影像近红外波段和红波段的反射率值.

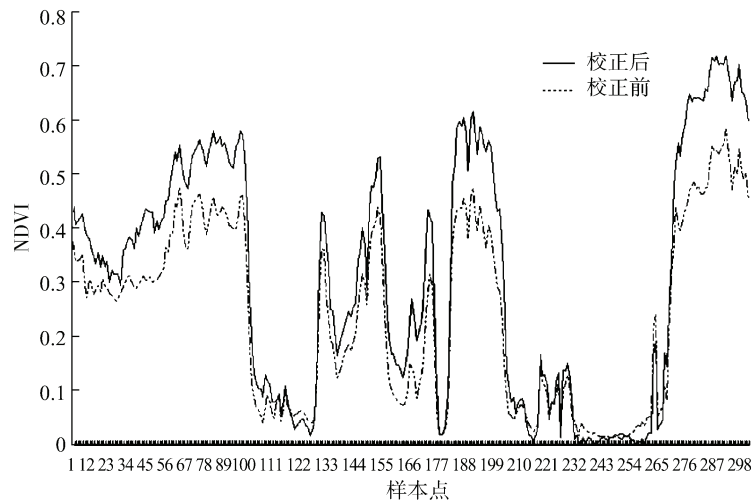


图 3 MODIS 影像大气校正前后某一剖面的 NDVI 值

Fig.3 NDVI of MODIS before and after atmospheric correction

校正前后 NDVI 的变化趋势基本上是一致的, NDVI 的峰值和谷值出现的位置整体上十分吻合, 说明大气校正前后图像的总特征是相同的; 大气校正后的峰值较校正前的峰值较高些, 而谷值一般比校正前的低些, 这说明经过大气校正后的 NDVI 动态范围更大些, 信息量也更丰富些; 对它们进行统计分析可知, 校正前 NDVI 的平均值和标准差分别为 0.324705 和 0.197345, 大气校正后 NDVI 的平均值和标准差分别为 0.413071 和 0.267082, 标准差反映了图像中的灰度值与平均值的离散程度, 标准差越大, 灰度级分布越分散, 图像的目视效果越好, 图像所含的信息量也越丰富<sup>[14]</sup>(图 3). 因此, FLAASH 大气校正在一定程度上有效地降低了大气对遥感影像的影响, 获得了地表真实反射率, 达到消除大气影响、增强信息的目的.

### 3 基于地表真实反射率的蓝藻信息提取

因本文研究的区域限定在太湖水体范围内, 为了提取蓝藻, 只需把蓝藻与太湖水体区别出来即可, 在太湖水面范围内分别取蓝藻采样点和水体采样点各 4 个, 选取样点的原则是: 既选取蓝藻浓度高的点也选取浓度低的点, 既选取清澈的水体也选取混浊的水体. 作出蓝藻与水体的反射率光谱曲线, 如图 4 所示, 为了突出差异, 反射率的值乘了 10000.

蓝藻与水体在可见光波段的反射率光谱特征比较相似, 在近红外波段反射率差异比较显著, 蓝藻在 B2 和 B4 波段有两个反射峰, 在 B1 波段有个吸收谷, 这是由于蓝藻含有叶绿素 a, 在可见光绿波段和近红外波段具有高的反射率, 而在可见光红波段反射率较低; 水体的反射率从可见光蓝波段到近红外波段总体上呈下降趋势(图 4). 吕恒利用实测叶绿素浓度与 MODIS 的 16 个可见光、近红外波段的相关性分析表明, 叶绿素与 MODIS 第 2 波段的相关性最好, 与第 1 波段的相关性最弱<sup>[11]</sup>; 闻建光等利用 TM 数据研究太湖叶

绿素 a 浓度反演的定量模型, 并通过模型估算结果与实测数据多相关分析表明利用叶绿素的反射峰和吸收峰处的 TM4 与 TM3 的比值作反演的精度较高<sup>[15]</sup>, TM4 和 TM3 波段对应于 MODIS 数据的 B2 和 B1 波段; 祝令亚等的研究表明利用 MODIS 数据的 B2 与 B1 波段的比值来反演太湖叶绿素 a 的浓度是可行的<sup>[16]</sup>. 因此本文利用 MODIS 近红外波段 B2 与可见光红波段 B1 的比值来区分蓝藻与水体. B2 与 B1 的比值图像见图 5(a), 图 5(a)中部分白色区域是去除岛屿形成的, 通过一定的阈值提取出蓝藻, 图 5(b)是经过试验当阈值为 1.9 时提取出来的蓝藻分布图. 由图 5(b)可知, 提取出来的蓝藻基本上与实际相符, 因此利用 MODIS 影像可以快速、及时地监测蓝藻爆发的位置及爆发程度.

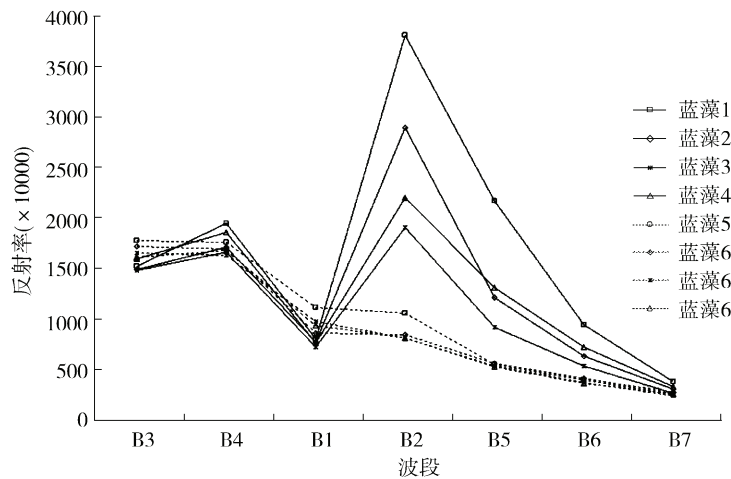


图 4 蓝藻水华与水体的反射率光谱曲线

Fig.4 Spectral character of cyanobacteria bloom and water

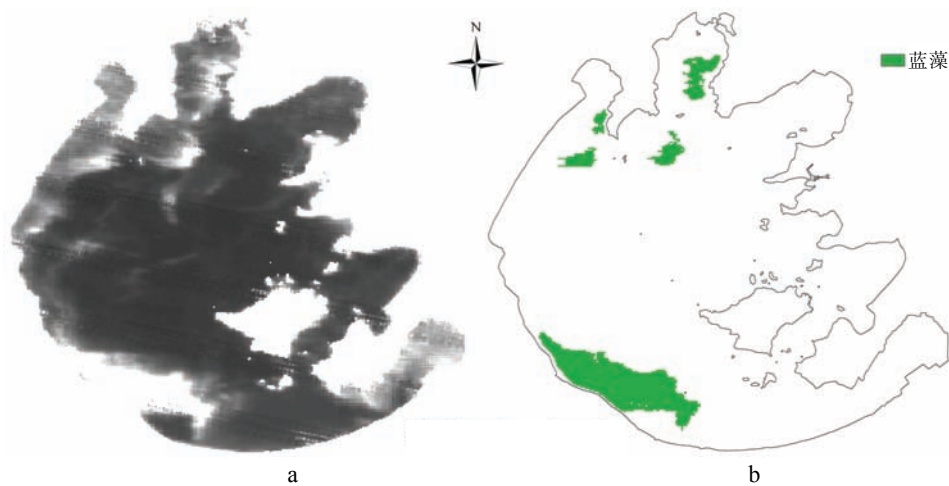


图 5 MODIS 影像蓝藻提取 (a)B2 与 B1 的比值图; (b)蓝藻水华分布图

Fig.5 Extract the cyanobacteria bloom from MODIS image

(a) ratio of B2 to B1; (b) distribution map of cyanobacteria bloom

#### 4 结论

湖泊是陆地水圈的重要组成部分, 遥感技术是一种区域性的水环境监测手段, 有快速、连续、动态、

相对成本低等优点,在湖泊水质的监测中有很大的应用潜力<sup>[17-18]</sup>,开展蓝藻水华的形成、漂移和堆积的遥感监测研究是蓝藻水华的预防措施之一<sup>[19]</sup>,MODIS 数据具有波段丰富、时间分辨率高等优点,利用 MODIS 数据可以快速、长期地对太湖蓝藻暴发的状况进行监测,但太阳辐射与地球大气的相互作用会引起 MODIS 传感器接收到的信号失真,为了提高利用 MODIS 数据对太湖蓝藻进行动态监测的精度,很有必要对 MODIS 数据进行大气校正.本文利用 FLAASH 模型对 MODIS 数据进行了大气校正,并对比分析大气校正前后的 NDVI 值,分析结果表明 FLAASH 模型在一定程度上有效地降低了大气对遥感影像的影响.用 FLAASH 模型对 MODIS 影像进行大气校正并获取地表真实反射率方便快捷、可操作性强,利用大气校正后获取的地表真实反射率数据提取太湖蓝藻信息,提取出来的结果基本上满足了动态监测蓝藻的需要,这证明利用 MODIS 影像可以及时、准确地监测蓝藻爆发的位置及爆发程度.但由于缺少同步的实测光谱数据,本文只能在理论上说明大气校正的效果,不能精确地评价大气校正的精度;在蓝藻信息提取部分,本文并没有尝试用其他波段组合模型去提取蓝藻,仅利用波段 B2 与 B1 的比值来提取蓝藻,存在着少部分漏提的蓝藻,因此探索精度更高的 MODIS 数据蓝藻信息提取模型是今后进一步研究的方向.

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所的段洪涛博士对本文写作的指导.

## 5 参考文献

- [1] 张霞,孙睿,张兵等.基于 MODIS 植被指数时间谱的华北平原土地覆盖分类.农业工程学报,2006,22(12): 128-132.
- [2] 刘玉洁,杨忠东等.MODIS 遥感信息处理原理与算法.北京:科学出版社,2001: 1-3.
- [3] 徐萌,郁凡,李亚春等.6S 模式对 EOS/MODIS 数据进行大气校正的方法.南京大学学报(自然科学版),2006,42(6): 582-589.
- [4] 尹球,巩彩兰,匡定波等.湖泊水质卫星遥感方法及其应用.红外与毫米波学报,2005,24(3): 198-202.
- [5] 郑伟,曾志远.遥感图像大气校正方法综述.遥感信息,2004,4: 66-70.
- [6] 王钊.6S 辐射模型算法解析及在 MODIS 大气校正中的应用.陕西气象,2006,5: 34-37.
- [7] 亓雪勇,田庆久.光学遥感大气校正进展.国土资源遥感,2005,(4): 1-6.
- [8] 宋晓宇,王纪华,刘良云等.基于高光谱遥感影像的大气校正:用 AVIRIS 数据评价大气校正模块 FLAASH.遥感技术与应用,2005,20(4): 393-398.
- [9] Research System Inc. FLAASH User's Guide. ENVI FLAASH Version 1.0, 2001: 8-40.
- [10] 池宏康,周广胜,许振柱等.表现反射率及其在植被遥感中的应用.植物生态学报,2005,29(1): 74-80.
- [11] 吕恒.太湖水质多尺度遥感定量监测研究[学位论文].南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所,2004.
- [12] 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.红外与毫米波学报,2007,26(1): 22-25.
- [13] 阿布都瓦斯提·吾拉木,秦其明,朱犁江.基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正.北京大学学报(自然科学版),2004,40(4): 611-618.
- [14] 胡子付,曾志远,张振龙等.小波和 HIS 变换结合实现 ETM 图像波段融合.地球信息科学,2005,7(4): 29-32.
- [15] 闻建光,肖青,柳钦火等.基于混合光谱理论的太湖水体叶绿素 a 浓度提取.地理科学,2007,27(1): 92-97.
- [16] 祝令亚,王世新,周艺等.应用 MODIS 检测太湖水体叶绿素 a 浓度的研究.遥感信息,2006,2: 25-28.
- [17] 吴敏,王学军.应用 MODIS 遥感数据监测巢湖水质.湖泊科学,2005,17(2): 110-113.
- [18] 吕恒,江南,李新国.内陆湖泊的水质遥感监测研究.地球科学进展,2007,20(2): 185-192.
- [19] 中国科学院南京地理与湖泊研究所.太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议.湖泊科学,2007,19(4): 357-358.