

文章编号: 1007-4619(2006)02-0176-08

# 基于混合像元分解的水体遥感图像去云法

吴传庆<sup>1,2</sup>, 王 桥<sup>1,3</sup>, 杨志峰<sup>2</sup>

(1. 中国环境监测总站, 北京 100029; 2. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875;

3. 南京师范大学 地理信息科学学院江苏省重点实验室, 江苏 南京 210097)

**摘 要:** 大型内陆水体的遥感图像中往往存在着不均匀薄云或者是气溶胶的影响, 由于种种原因, 传统的大气辐射校正算法无法消除这种不均匀影响, 这就给遥感图像的大气校正带来了很大困难。由于水体属于低反射率地物, 这种薄云或者气溶胶的不均匀性带来的误差, 极大地降低了水体遥感图像的信噪比, 进而影响水体信息遥感提取精度。根据部分太湖地区的遥感图像和地面实测数据, 作者以一种新的思路来尝试解决这个问题。该方法充分考虑了水气环境的特点, 把水体像元光谱看作水、污染物和气溶胶(薄云)等光谱的混和。基于混合像元模型, 该方法有效地消除了薄云和气溶胶的影响, 可使我们通过遥感手段更加精确地提取水质信息。

**关键词:** 去云; 混合像元; 遥感

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A

## Cloud Moving of Water RS Image Based on Mixed Pixel Model

WU Chuan-qing<sup>1,2</sup>, WANG Qiao<sup>1,3</sup>, YANG Zhi-feng<sup>2</sup>

(1. Environmental Satellite Center Preparing Office Chinese State Environmental Protection Administration Beijing 100029, China;

2. School of Environmental Sciences Beijing Normal University Beijing 100875, China;

3. Key Lab Of Jiangsu Province College of Geographic Information Science Nanjing Normal University Jiangsu Nanjing 210097, China)

**Abstract** There are always some uneven aerosol or thin cloud effects in the remote sensing image of large-scale inland water. These uneven effects bring great difficulty to atmospheric radiant correction of remote sensing images in such regions. Furthermore, because the water is the object with low reflectivity, these uneven effects bring large errors to the water information inversion by remote sensing technology. For some reasons, it is some times impossible for us to use traditional atmospheric radiant correction algorithms (such as MODTRAN or 6S software) to reduce such effects. With some remote sensing images and ground collecting data in Taihu Lake in China, an important inland water research place of Chinese remote sensing scholars, the authors use a new method to resolve this problem. This method considers the optical characteristics of water-atmosphere environment carefully, assumes each pixel's spectrum is the mixed result of water, pollutant and aerosol or thin cloud, for the optical property of Taihu Lake's remote sensing images is determined by water, pollutant and aerosol or thin cloud. Based on Mixed Pixel Model, this method reduces the effects of aerosol and thin cloud effectively. After the process of this method, we can get more veracious water quality information from remote sensing images. In author's test, to the same remote sensing inversion model, this method can increase 5 percent precision.

**Key words:** cloud moving; mixed pixel; remote sensing

收稿日期: 2004-08-24; 修订日期: 2004-10-10

基金项目: 国家 863 项目 (2003AA131060) 支持。

**作者简介:** 吴传庆 (1977—), 男, 工程师, 毕业于中国科学院遥感应用研究所, 遥感与 GIS 专业, 研究生阶段主要从事高光谱图像和光谱数据处理, 信息提取和特征分类等研究。目前主要进行环境信息的遥感提取研究, 发表文章 10 余篇。E-mail: cqwu317@sina.com;

wu\_chuanqing@zhb.gov.cn

## 1 引言

水体是一种重要的自然环境,水环境遥感是环境遥感应用的重要领域之一,大体分为海洋遥感和内陆水体遥感。内陆水体受自然地理特性和人类活动的影响较大,其特性较为复杂。与内陆水体相比,海洋遥感技术成熟得多,原因是多方面的:一是海洋通常被看作单一成分系统,其特性主要由浮游植物的浓度决定,变化相对简单<sup>[1]</sup>;二是海洋的水质比较均匀,对分辨率的要求不高,从而能够制造出高信噪比的海洋传感器;三是海洋遥感的大气校正能达到较高精度。内陆水体遥感研究已有很多,主要集

中在叶绿素和悬浮物两个方面,与海洋遥感相比精度较低。太湖是国内水环境遥感研究和实验的一个重要区域,很多单位在太湖做了大量遥感工作。作者收集了大量已有模型,其主要以叶绿素和悬浮物的相关性模型为主,但精度和通用性不高。如图 1,由于太湖水体上方的气溶胶浓和薄云分布不均匀,给大气校正带来很大的难度,目前还没有找到有效的水体上方气溶胶去除或者是大气校正方法。无法进行有效的大气校正水质遥感模型精度不高的主要原因。通过仔细地观察和思考,作者基于混合像元分解法,从一个新的思路研究了水体上方不均匀气溶胶和薄云去除方法。该方法能够取得较好的大气校正结果,提高水环境遥感模型的精度。

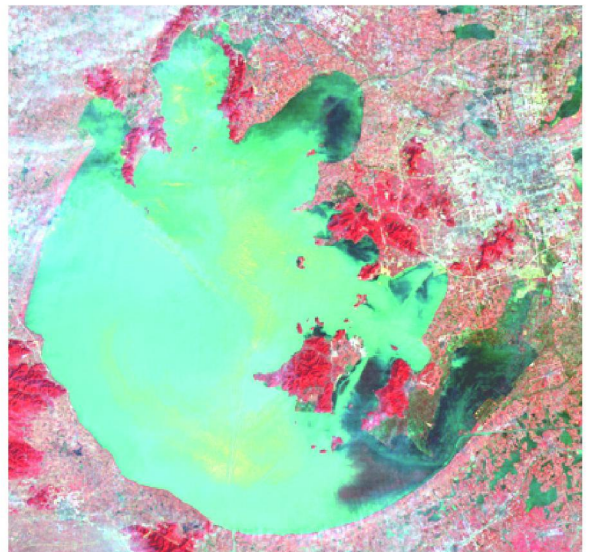
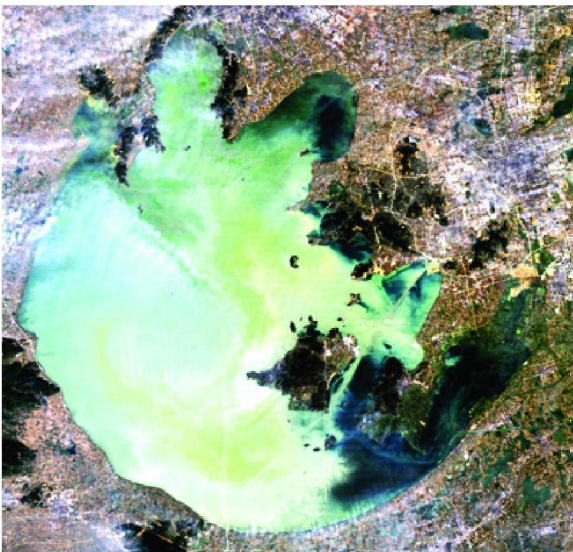


图 1 2003年 11月 TM 真彩色和彩红外图像

Fig 1 True-color image and Infrared image of TM obtained in 2003 11

## 2 混合像元分解

像元是遥感器获取地面反射或发射光谱信息的记录单位。图像中每个像元所对应的地表,往往包含不同的覆盖类型,它们有着不同的光谱响应特征,而每个像元则仅用一个信号记录这些“异质”成分。所以说像元值是像元地表响应范围内物质光谱信号的共同贡献。若该像元仅包含一种类型,则为纯像元,像元记录的正是该类型的光谱信号;若该像元包含不止一种土地覆盖类型,则其称为混合像元,它记录的是不同土地覆盖类型光谱信号的综合。如:植被稀疏地区的遥感影像,其像元范围内往往是植物、植被阴影、垫面土壤的混合光谱响应。

混合像元的存在,是很多传统像元级遥感模型精度不高的主要原因。由像元级达到亚像元级,进入像元内部,将混合像元分解为不同的“基本组分单元”或称“端元”(Endmember),并求得这些基本组分单元所占的比例。这就是“混合像元分解”。

多年来国内外学者们探索遥感光谱成像机理,模拟光谱的混合过程,研究和多种混合光谱分解方法,提出了不同的光谱混合模型,如线性、概率、几何光学、随机几何、模糊模型等,并展开了广泛的应用<sup>[2-4]</sup>。本文采用的混合模型是线性光谱混合模型。

线性光谱混合模型(LSMM)是混合像元分解的常用方法。其定义为:像元在某一光谱波段的反射率(亮度值)是由构成像元的端元反射率(光谱亮度

值)以其所占像元面积比例为权重系数的线性组合。可用以下公式表达:

$$R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} C_{k\lambda} + \epsilon_{i\lambda} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^n f_{ki} = 1 \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中,  $R_{i\lambda}$  为第  $\lambda$  波段第  $i$  像元的光谱反射率(已知);  $f_{ki}$  为对应于  $i$  像元的第  $k$  个端元所占的分量值(待求);  $C_{k\lambda}$  为第  $k$  个基本组分在第  $\lambda$  波段的光谱反射率;  $\epsilon_{i\lambda}$  为残余误差值(即光谱的非模型化部分);  $n$  为基本组分的数目,  $m$  为可用波段数, 波段数要大于  $n$ , 以便利用最小二乘法求解。

评价模型用残差  $\epsilon_{i\lambda}$  或均方根误差 RMS 表示:

$$RMS = \left[ \sum_{k=1}^{\lambda} (\epsilon_{i\lambda})^2 / n \right]^{1/2} \quad (3)$$

LSMM 模型从混合像元中  $R_{i\lambda}$  分离和提取出各端元的平均光谱响应  $C_{k\lambda}$ , 通过求解线性方程来反解端元在像元中所占的面积比例  $f_{ki}$ , 从而将所有像元分解成这些基本组分的分量。模型计算的结果表现为各端元的分量值(图像)和以均方根误差表示的残余误差图像。通常以均方根误差 RMS 和残余误差尽可能小, 以及像元分解后的分量  $f$  应满足  $0 \leq f \leq 1$  的标准, 来衡量和评价端元选择的好坏。

### 3 光学几何模型

如图 2 所示, 在进行内陆水体遥感时, 传感器所获取到的信息主要有: 水体出水辐射、天空光的水面反射、大气程辐射(包括气体分子散射即瑞利散射、气溶胶散射、气溶胶与气体分子之间的相互作用)、气溶胶和薄云的反射; 由于航天传感器往往以垂直或者近似垂直向下的角度获取信息, 太阳光的反射可以忽略; 水面以上的光谱辐亮度信号组成是:

$$L_{sw} = (L_w + rL_{sky}) \times T_1 + L_q \times T_2 + \Delta L \quad (4)$$

式中,  $L_{sw}$  是总信号;  $L_w$  是进入仪器的水体出水辐射(进入水体的光被水体散射回来),  $rL_{sky}$  是水面反射进入仪器的天空光信号,  $L_{sky}$  是天空光辐射,  $r$  是气水界面反射率,  $T_1$  是水面到传感器的大气透过率, 其中天空光信号没有任何水体信息;  $L_q$  是气溶胶和薄云反射的能量,  $T_2$  是气溶胶和薄云到传感器的大气透过率,  $\Delta L$  是大气的程辐射进入仪器的能量, 大气程辐射实际就是直接进入传感器的天空光<sup>[6-9]</sup>。

如果没有气溶胶和薄云, 这时的大气状态就是目前常用大气校正模型的建立环境, 用模型进行大

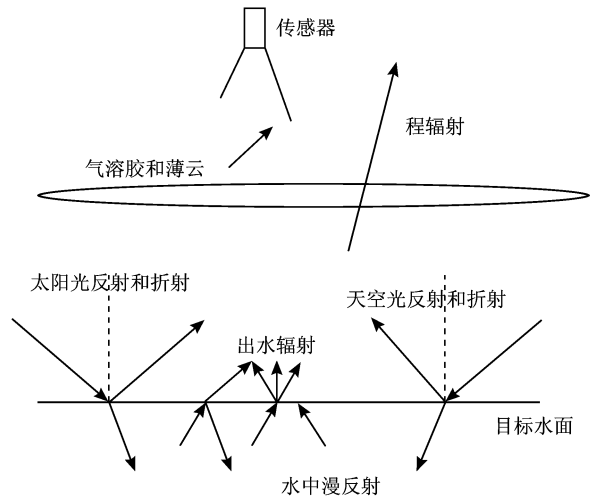


图 2 光学分析图

Fig 2 Optical analysis chart

气校正往往能够得到较好的结果。而内陆水体往往存在着气溶胶和薄云的影响, 其影响主要表现为:

(1) 对向下辐射的反射, 这部分能量即为  $L_q$ ; (2) 对向上能量的反射; (3) 对透射能力的散射。后两种影响的主要表现为: ①对水面而言增强的天空光能量(阴天比蓝天的天空光更强也是这个道理); ②减小了大气的透过率。气溶胶和薄云的不均匀性, 使常用的大气校正模型无法应用, 因此, 有效地消除气溶胶和薄云影响是水体遥感大气校正的关键。

首先, 我们假设大气中水平平面上天空光和大气透过率是均匀的。在模型中, 我们不细致地分析气溶胶或者薄云对光线的反射、透射和散射, 而是把水面以上到传感器之间的气溶胶和薄云当作一种地物; 同时把水体连同其与传感器之间的大气看作同一地物“水”, 污染物连同其与传感器之间的大气看作同一地物“污染物”。传感器获得的能量是水、污染物、气溶胶和薄云的线性光谱混合。本文中我们只分析本方法的可行性, 鉴于太湖水面地物的单一, 不考虑气溶胶和薄云的种类与区别, 假设二者为同一地物(这里为薄云), 即端元光谱一致。因此, 水体遥感图像中每一像元可看作纯水、叶绿素和薄云线性光谱(能量)的混合。

### 4 数据准备

本方法的实验数据为 2003 年 11 月份的太湖北部区域的数据。太湖地处长江三角洲, 面积 2427.8 km<sup>2</sup>, 湖底地形十分平坦, 平均坡度为

0°0'19.66",平均水深 1.89m,容量不大,调蓄能力较弱,但有利于湖水混合,使全湖水文特性、化学成分常处较均匀状态<sup>[10]</sup>。湖泊水体中决定光谱反射率的物质主要有三类:

(1)浮游植物,主要是藻类;(2)由浮游植物死亡而产生的有机碎屑以及陆生或湖体底泥经再悬浮而产生的无机悬浮颗粒,总称为非色素悬浮物(简称悬浮物);(3)由黄腐酸、腐殖酸组成的溶解性有机物,通常称为黄色物质。其中以第一类为主。

遥感图像选用 TM 图像(1-7波段),几何校正配准精度要求 0.5个像元。通过选择太湖沿岸地物和湖中岛屿、固定建筑物等为参照物(图 3)以保证水域的配准精度,几何校正由 ERDAS 软件完成。地面同步水样点数据 21个,测量参数有:经纬度、悬浮物浓度(SS)、叶绿素浓度、总有机碳(TOC)、总磷和总氮。

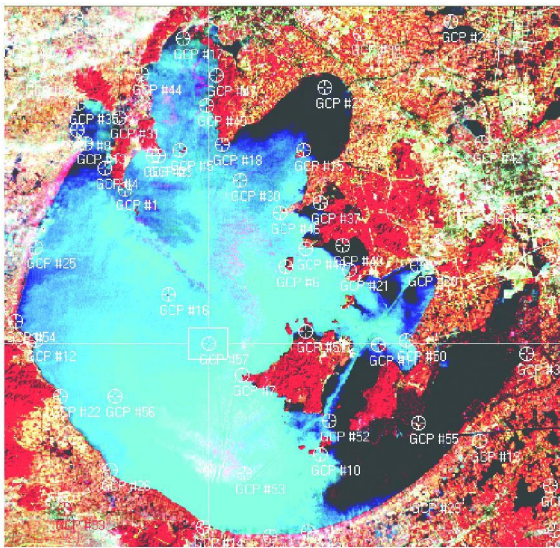
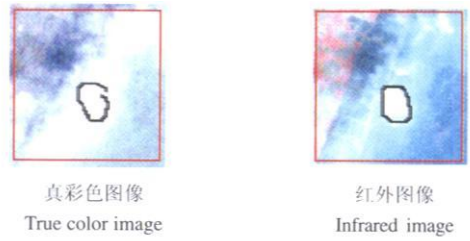


图 3 几何校正控制点选择情况

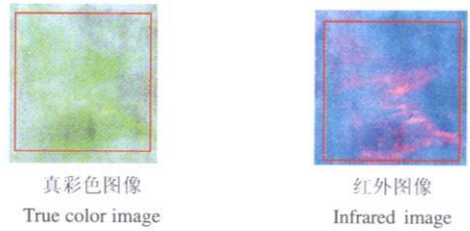
Fig 3 Ground control points choosing

### 5 方法描述

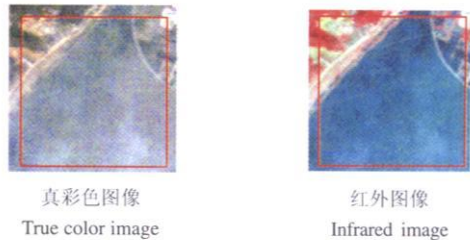
首先提取纯水、叶绿素、薄云三种地物的纯光谱(这里是 DN 值,图像获取时由于地理环境等多方面条件的限制,没有进行辐射定标,因此无法进行较为准确的反射率转换)。根据遥感图像,我们选取了三个地物的代表样区,样区内像元的均值为地物各波段的取值,各地物在 TM 七个波段的 DN 值如表 1,样区选择如图 4 所示,最后得到的 DN 值曲线如图 5 所示。



(a) 白云和气溶胶的纯像元选择区  
(a) Cloud pure pixel choosing



(b) 叶绿素的纯像元选择区  
(b) Chlorophyll pure pixel choosing



(c) 水体的纯像元选择区  
(c) Water pure pixel choosing

图 4 地物样区的选择

Fig.4 Region of interest choosing

表 1 三种地物各波段 DN 值

Table 1 Three Objects' value of each band

波段号	波长 /nm	云	叶绿素	水体
1	485	158.708	73.432836	75.229091
2	560	79.58407	39.611194	33.414545
3	660	115.6106	42.223881	40.810909
4	845	69.28319	53.626866	18.072727
5	1650	69.39823	25.477612	11.025455
6	11450	95.0354	99	98.494545
7	2215	30.79646	6.373134	4.556364

分析各波段情况可以发现,三种地物在第 6 波段具有很大的相关性,不适合作为混合像元分解的分析波段。其原因可能是:第 6 波段是热红外波段,水体在热红外的反射率非常低,热红外波段接收到的实际上只是大气热辐射信息而没有水体信息。多种考虑,我们只选择 1-5,7 波段进行混合像元分解。

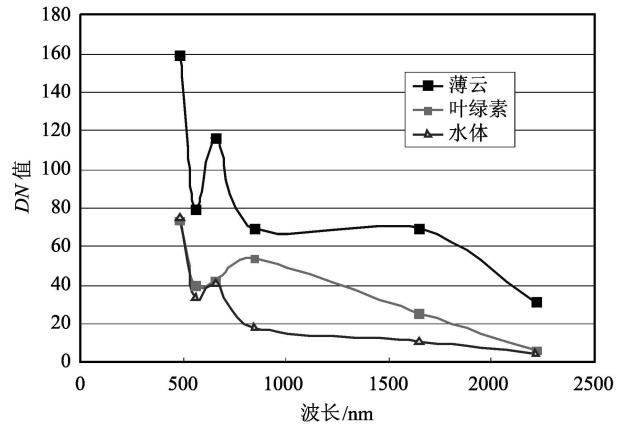
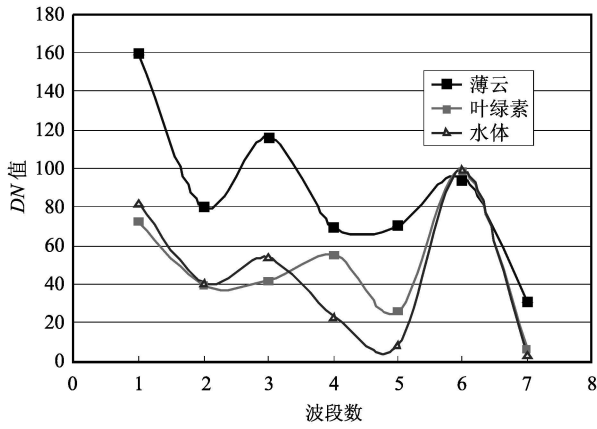
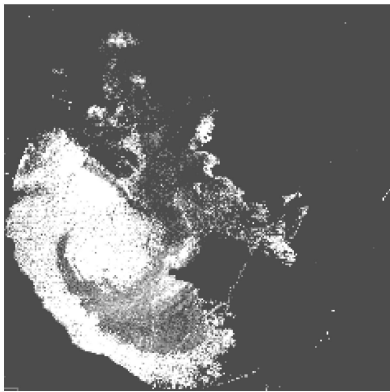


图 5 DN 值光谱曲线图

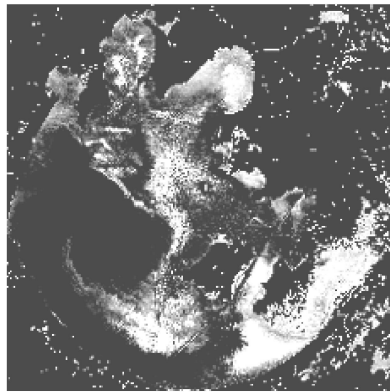
Fig 5 DN spectral curves chart

利用三种纯像元地物的 DN 值对遥感图像的太湖水面区域进行线性分解,图 6 从左往右分别是云、

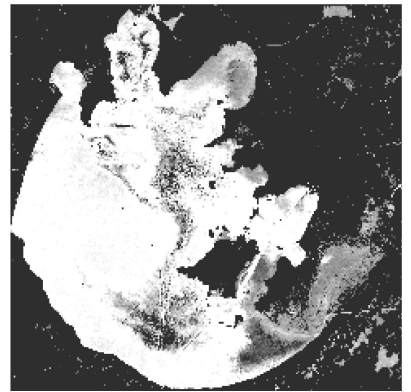
藻和水的 3 端元混合模型分量图,分别表示了三种地物在太湖的分布情况。



云  
Cloud



藻  
Algae



水  
Water

图 6 太湖地区 TM 图像 LSMM 分量图

Fig 6 LSMM three weight maps of TM image in Taihu Lake region

我们把线性分解的最后结果视为各种地物对光谱分辨率的贡献参数。去除薄云和气溶胶的影响,实际就是去掉云的贡献,相应应该增加其他地物的贡献。设云、水、藻的贡献参数为  $a_1, a_2, a_3$ ; 某一波段三种地物相应的 DN 值为  $R_1, R_2, R_3$ , 原像元该波段的 DN 值为:

$$DN = R_1 \cdot a_1 + R_2 \cdot a_2 + R_3 \cdot a_3 \quad (5)$$

去除云,根据权重系数重新归一化,可得:

$$DN_1 = \frac{a_2 E}{a_2 + a_3} + \frac{a_3 E}{a_2 + a_3} = \frac{a_2 E + a_3 E}{a_2 + a_3} \quad (6)$$

对一个波段的某一像元,我们并不能分解出三种地物的 DN 值,所以利用该像元 DN 值的比值关系进行调整。

$$\frac{DN_1}{DN} = \frac{a_2 E + a_3 E}{a_2 + a_3} \cdot \frac{1}{R_1 \cdot a_1 + R_2 \cdot a_2 + R_3 \cdot a_3} \quad (7)$$

$R_1, R_2, R_3$  取纯像元光谱的 DN 值。

### 6 模型检验

观察图 5 中的两幅曲线图,可以看出云与水的 DN 值曲线其形状上比较类似,藻类曲线与二者的差别较大,特别是在第四(近红外)波段,藻类曲线在此明显地有一个反射峰,因此我们把第四波段看作藻类的特征波段。把同步采集水样的叶绿素浓度与相应测点的第四波段处理前后的 DN 值进行比较,以对本方法进行验证。表 2 所列的是 21 个地面

表 2 21 个水样点相关参数值  
Tabel 2 Parameters of 21 water samples

编号	经度 / (°)	纬度 / (°)	叶绿素 (µg/L)	处理前 B <sub>4</sub>	处理后 B <sub>4</sub>
1	120 19797	31. 50347	17. 43	29	28. 4298
2	120 15924	31. 49644	17. 97	23	23
3	120 17357	31. 46607	7. 81	24	24
4	120 16942	31. 42072	24. 22	25	24. 9715
5	120 10607	31. 37515	9. 37	20	19. 3327
6	120 02018	31. 35992	4. 69	20	17. 9344
7	120 00273	31. 30728	5. 47	18	15. 3815
8	120 09297	31. 32966	159. 59	39	39
9	120 16276	31. 34758	13. 28	21	19. 7213
10	120 23423	31. 37400	8. 59	23	23
11	120 29144	31. 39937	9. 37	15	15
12	120 34719	31. 42877	7. 03	13	13
13	120 29568	31. 35357	7. 03	18	18
14	120 24051	31. 31536	4. 52	24	24
15	120 17296	31. 29017	49. 22	39	38. 6894
16	120 08531	31. 26662	7. 33	20	16. 7822
17	119. 99381	31. 24397	5. 47	17	15. 0266
18	119. 99829	31. 18785	9. 37	23	22. 0296
19	120 07833	31. 20304	3. 91	18	15. 7079
20	120 17833	31. 23051	3. 91	24	24
21	120 25012	31. 26033	3. 12	24	24

测点的值,部分点(如第 2、3 点)由于没有云和气溶胶的影响,其第四波段 DN 值处理前后没有变化,这些点不参与检测。阴影区域值为最后进行检测的数据源。

表 3 为图 7 趋势线的方程式和 R 平方值。从曲线形状和 R<sup>2</sup> 可以看出来,处理后的曲线 R<sup>2</sup> 更接近 1,说明其拟合程度更好,可靠性更高。

表 3 趋势线方程式和 R<sup>2</sup>

Table 3 The equation and R<sup>2</sup> of trend line

趋势线类型	处理前	处理后
线性	$y=0.4564x+16.513$	$y=0.5083x+14.353$
	$R^2=0.8979$	$R^2=0.8983$
对数	$y=7.4577 \ln(x)+5.5735$	$y=8.5168 \ln(x)+1.6836$
	$R^2=0.8099$	$R^2=0.8521$

## 7 结 论

如图 8 所示,对比处理前后同一地区的遥感图像,可以看出本方法较好地去除了云和气溶胶的影响,一定程度上恢复了下垫面的实际情况。图 7 的趋势线和表 3 的数据也表明,本方法一定程度上改善了原始数据的质量,使其更加准确地反映了水质实际情况。因此,利用混合像元分解法进行内陆水体上方薄云和气溶胶的去除是可行的。由于实验条件限制和获取数据有限,实验还不够完善。通过研究分析,作者认为从以下角度入手进行改进,可以更好地提高本方法的去云效果:

(1) 增加端元数量。由于数据获取时作者并没有到现场实测,从图像上无法准确地选出悬浮物

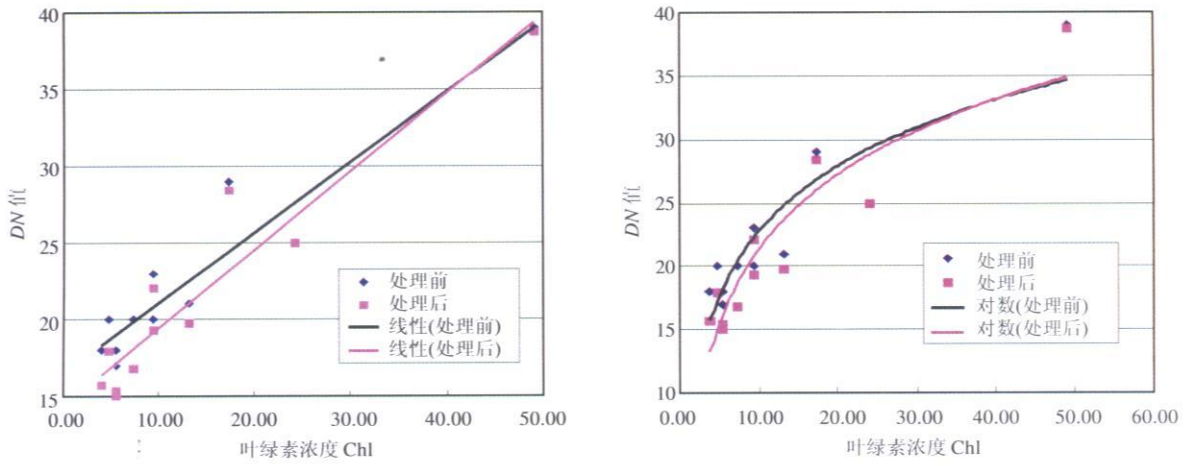
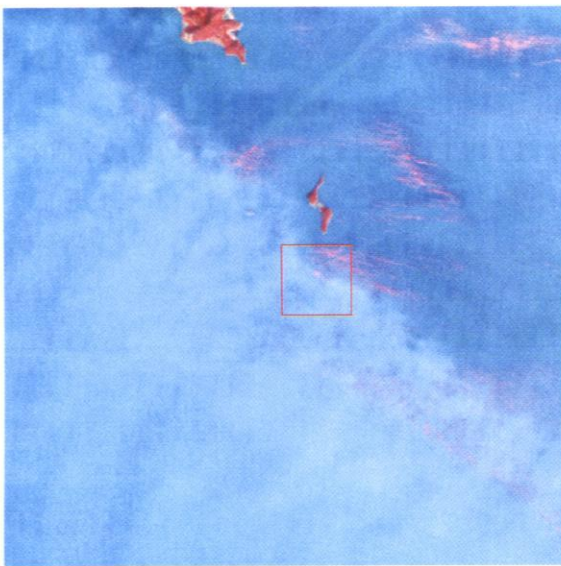


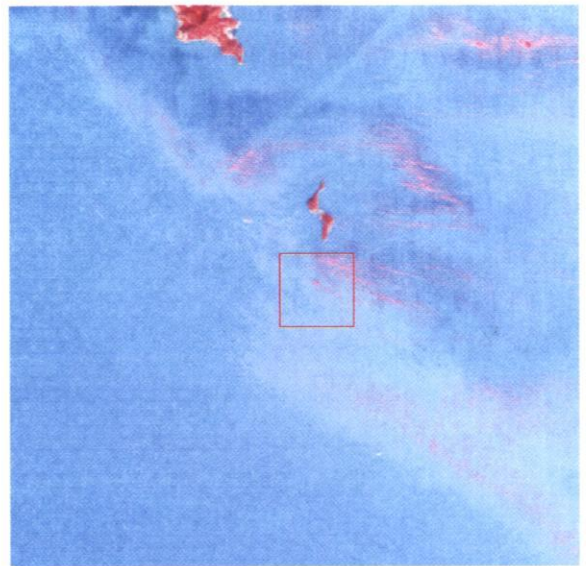
图7 叶绿素浓度与第四波段DN值的趋势线图

Fig.7 The trendline of chlorophyll concentration and the fourth band DN value



(a) 处理前太湖部分水体遥感图

(a) Part of Taihu Lake remote sensing image before process



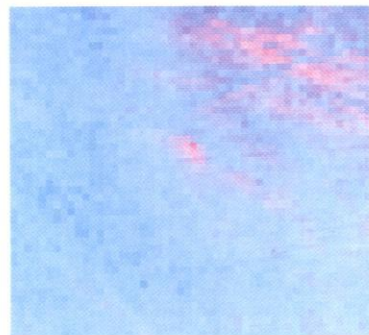
(b) 处理后的图像情况

(b) The same part after process



(c) 上图红框放大图

(c) The magnified image of red frame in image above



(d) 上图红框放大图

(d) The magnified image of red frame in image above

所示位置的混合像元分解值为：云—0.101546，藻类—0.195887，水—0.665559

图8 遥感图像处理前后对比图 Fig.8 Remote sensing image before and after process

和黄色物质的样区,以及薄云和气溶胶的样区。因此端元选择时,悬浮物和黄色物质与水归为了一类,薄云和气溶胶归为了一类,这在很大程度上降低了混合像元分解的精度。如果能够准确勾绘出这些端元的样区,势必能够提高本方法的去云效果。

(2)提高端元光谱的采集精度——通过实地观测或者图像的主成分特征空间散点图分析等方法准确地选定样品区,以获得更准确的端元光谱。

(3)寻找更有效的分解合成方法——线性分解和线性叠加过于简单,希望能够从成像机理上找出一种更加合理有效的方法,以进一步提高图像的质量。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Helgi Arst. Optical Properties and Remote Sensing of Multicomponental Water Bodies [ M ]. Chichester UK: Praxis Publishing, 2003.
- [ 2 ] Roberts D A, Gardner D A, Church M, et al. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains Using Multiple Endmember Spectral Mixture Models [ J ]. Remote Sens Environ, 1998, **65**: 267—279.
- [ 3 ] Shao M Z. Unmixing of Mixture Pixel based on PCA [ J ]. Chinese Spacial Science Technology, 1989, **9**(5): 63—68 [ 邵美珍. 基于主成分的混合像元分解 [ J ]. 中国空间科学技术, 1989, **9**(5): 63—68 ]
- [ 4 ] Zhuang J L, Chen L F, Xu X R. Inversing of Mixture Pixel's Component Parameters by Inherit Nerve Net [ J ]. Journal of Remote Sensing, 2000, **4**( supplement ): 31—37. [ 庄家礼, 陈良富, 徐希孺. 利用遗传算法优化神经网络实现混合像元组分参数的反演 [ J ]. 遥感学报, 2000, **4**(增刊): 31—37. ]
- [ 5 ] Zhao Y S. Principle and Method of Remote Sensing Application [ M ]. Beijing: Science Press, 2003. [ 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2003. ]
- [ 6 ] Gregg W W, Chen F C. The Simulated SeaWiFS Data Set (Version 1) [ A ]. NASA Technical Memorandum 104566, SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series [ C ]. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt MD, 1993, Vol 9, 17.
- [ 7 ] Deschamps P Y, Heman M, Tanre D. Modeling of the Atmosphere Effects and Its Application to the Remote Sensing of Ocean Color [ J ]. Appl Optics, 1983, **22**: 3751—3758.
- [ 8 ] Gordon H, Wang M. Influence of Oceanic Whitecaps on Atmospheric Correction of Ocean-Color Sensor [ J ]. Appl Optics, 1994, **33**: 7754—7763.
- [ 9 ] Wang M. A Sensitivity Study of the SeaWiFS Atmospheric Correction Algorithm: Effects of Spectral Band Variations [ J ]. Remote Sensing Environ, 1999, **67**: 348—359.
- [ 10 ] Huang Y P. Aqueous Environment of Taihu Lake and It's Pollution Control [ M ]. Beijing: Science Press, 2001. [ 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2001. ]