

# 基于 ASTER 数据的混合像元分解技术 在水质监测与评价中的应用

杨强<sup>①</sup>, 张志<sup>②</sup>, 覃志豪<sup>①③</sup>, 李文梅<sup>①</sup>

(<sup>①</sup> 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; <sup>②</sup> 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

<sup>③</sup> 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

**摘要:**以 ASTER 数据为数据源对湖北省钟祥市胡集虎山尾矿库水质状况进行了监测与评价。文中运用 FLAASH 模型对 ASTER 数据进行了大气辐射纠正, 并对数据进行了几何纠正。因 ASTER 数据空间分辨不能很好地满足水质监测的精度要求, 故而在文中使用波谱沙漏分析对 ASTER 数据进行混合像元分解, 提取到研究区的水体信息, 同时在获得基于 ASTER 数据的纯净像元指数基础上, 利用反距离权重算法对野外采样点处混合像元的光谱反射率值进行计算。通过对比试验结果, 利用数学统计方法建立了实测污染物数据与水体反射率比值间显著相关的反演模型, 并对模型进行显著性检验, 最后利用建立的模型对水体反射率进行运算处理, 得到研究区水体相应污染物浓度分布, 完成了对研究区水体的水质状况的监测与评价。

**关键词:** 水质遥感监测; 大气纠正; 混合像元; 相关分析

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.02.004

**中图分类号:** TP79    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-3177(2011)114-0020-06

## Decomposition Technique of Mixed Pixel Used in Monitoring and Evaluation of Water Quality Based on ASTER

YANG Qiang<sup>①</sup>, ZHANG Zhi<sup>②</sup>, QIN Zhi hao<sup>①③</sup>, LI Weir mei<sup>①</sup>

(<sup>①</sup> School of Geographic and Oceanographic Sciences of Nanjing University, Nanjing 210093;

<sup>②</sup> Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

<sup>③</sup> International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract:** This paper has made use of ASTER data to monitor and evaluate water quality of Hushan tailings, Zhongxiang city, Hubei province. FLAASH was used to atmospheric radiation correction, and geometric correction was done to the results further. Because the spatial resolution of ASTER data does not meet the precision requirement of water quality monitoring, this paper exert spectral hourglass analysis to decomposed mixed pixel of ASTER data, and finally got PPI. Then according to the theory of spatial autocorrelation, the reflectance of mixed pixel was computed. By comparing test results, the model was build that the relationship between the measured data of contamination and reflectance was clearly correlative, and it passed correlative test. At last, the model was used to calculate and create distributed graph of contamination of the water, so this paper has achieved monitoring and calculation of water quality research.

**Key words:** water monitoring by remote sensing; atmospheric radiation correction; mixed pixel; correlation analysis

收稿日期: 2010-03-09    修订日期: 2010-04-20

作者简介: 杨强(1982~), 男, 博士研究生, 研究方向: 遥感技术与应用。

通讯作者: 覃志豪(1962~), 男, 南京大学教授和博士生导师, 主要从事热红外遥感和农业遥感研究。

**E mail:** cgyqiang@126.com

## 1 引言

从 20 世纪 70 年代初期陆地卫星发射成功以来, 遥感技术逐渐应用到陆地水体的研究中, 国内外学者开展了大量的试验和研究工作, 水色遥感从最初单纯的水域识别发展到水质遥感监测、制图、定量评价与预测<sup>[1-4]</sup>。利用遥感数据可以快速地对研究区水资源进行监测与评价, 且成本低, 监测范围广, 并可发现一些常规方法难以揭示的污染源、污染物迁移规律、影响范围<sup>[5-9]</sup>, 从而为水资源的保护与治理提供决策依据, 以保障社会的可持续发展。近年来, 随着传感器技术的迅速发展, 高分辨率、高光谱和多极化等新型遥感数据的出现, 为遥感走向微观定量水质监测提供了数据保证<sup>[10-13]</sup>。水质遥感监测从定性逐渐发展到定量, 同时, 利用遥感技术可监测的水质指标也不断增加, 包括水深、水温、叶绿素 a、悬浮物、黄色物质、富营养化、溶解性有机碳、生化需氧量、化学需氧量、金属离子、高锰酸钾指数等, 且反演精度也不断在提高<sup>[13-23]</sup>。

在水质遥感监测的研究应用中, 高空间分辨率的遥感数据往往因缺乏足够的光谱信息, 很难应用到水质定量监测与评价中去, 而使用中低空间分辨率的数据, 虽其时间分辨率高, 覆盖范围大, 具有很强的优势, 但由于空间分辨率低, 像元混合严重, 在对小面积水体的水质进行监测时, 陆地与水体之间、水体本身都必然会产生混合像元, 从而严重影响到水质监测与评价的精度。本文以 ASTER 数据(成像时间为 2006 年 4 月 16 日)为数据源对湖北省钟祥市胡集虎山尾矿库水质状况进行了监测与评价。ASTER 数据具有丰富的光谱信息, 在对研究区水体进行监测时, 因其空间分辨率给水质监测的精度带来了影响, 故而文中使用波谱“沙漏”分析对 ASTER 数据进行了混合像元的分解, 并根据空间自相关理论, 利用反距离权重算法对采样点处混合像元的光谱反射率值进行计算, 为水质监测的定量分析提供了保证。

## 2 研究区概况

研究区位于湖北省钟祥市荆襄磷矿区, 地理坐标为  $N31^{\circ}26'53'' \sim N31^{\circ}27'21''$ ,  $E112^{\circ}14'45'' \sim E112^{\circ}15'18''$ , 面积为 28.56ha, 位置优越, 地貌类型复杂, 气候湿润, 雨量充沛, 四季分明, 同时, 交通方便, 荆襄高速公路、焦柳、荆沙铁路穿境而过, 207 国道、汉宜省道纵横交错, 县乡道路密织如网, 各个矿山之间皆有道路相通。研究区是全国著名的“磷矿之都”,

其矿体产于震旦系陡山陀组鄂西浅海台上的沉积磷矿床, 主要赋于含磷碳酸盐建造中, 矿层位于建造的下部, 距下面侵蚀面不远的部位。磷块岩赋存于底部黑色炭质岩、薄层硅质岩块。其特点是矿层厚、层数多、规模大, 品位佳, 为中国重要的磷块岩矿床之一, 磷矿石总储量为 5.4 亿吨, 居全国第一, 开采居全国第二。

虎山尾矿库地处荆襄磷矿区中部, 胡集镇的西北方向, 是胡集磷化工区污水、磷矿山开发后暴露的磷矿石及废渣等淋滤物的聚集地, 其周围有多家磷矿公司及其分选厂, 早期磷矿的无序开采, 以及环境保护措施力度不够, 使周围堆积了大量的磷矿石、废渣, 工业污水直接排放, 加上该地区年降水量较大, 经过风化的磷矿石、废渣在雨水的冲刷下汇集到水库中, 致使虎山水库水体遭到破坏, 水体污染严重, 同时, 该地区河流、湖泊发育良好, 水质污染对下游工农业发展、居民生活有着深远的影响。

## 3 数据处理

### 3.1 大气校正

文中使用 FLAASH 模块对 ASTER 数据进行大气辐射校正。FLAASH 模型是精度较高的大气辐射校正模型, 直接结合了 MODTRAN4 大气辐射传输编码, 能有效地消除大气和光照等因素对地物反射的影响, 获得地表较为准确的反射率、辐射率和发射率等遥感物理参数。同时, FLAASH 模型可以校正临近像元效应, 并提供对整幅影像的能见度的计算。另外, 还能生成卷云与薄云的分类影像, 对光谱进行平滑, 消除噪声<sup>[24-25]</sup>。

在利用 FLAASH 模块对 ASTER 数据校正时, 本文对 1B 级的 ASTER 数据进行辐射定标, 之后将其转换成 BIL 数据格式, 然后启动 FLAASH 模块, 输入尺度转换因子, 并设置相关参数: 图像的中心点坐标, 传感器类型, 海拔高度, 数据获取时间和卫星过境时间, 大气模型, 水汽反演, 气溶胶模型, 其中, 图像的中心坐标点、时间从原始影像上读取; 海拔高度为研究区的平均海拔, 即根据研究区 ASTER 立体像对提取的数字高程模型(DEM)的平均海拔; 大气模型定义为中纬度夏季大气状况, 气溶胶模型定义为乡村气溶胶模型, 设置可见度为 40km, Modtran 分辨率设置为  $5\text{cm}^{-1}$ , 最终运行 FLAASH 模型, 输出反射率数据, 完成 ASTER 数据大气纠正。

### 3.2 几何纠正

本文对 ASTER 数据进行了正射纠正, 其中使

用的参考数据源为 1:50000 地形图, DEM 数据是通过根据 ASTER 数据的立体像对提取。在操作过程中, 选取了 18 个地面控制点, 通过运行二次多项式模型, 对其精度进行控制, 使其精度在一个像元以内, 最后对像元的灰度值使用最邻近法进行插值计算, 完成了对 ASTER 遥感数据的正射纠正。

### 3.3 混合像元分解及水体信息提取

遥感器所获得的地面辐照度信息是以像元为单位记录, 它是像元对应的地表物质光谱信号的综合。图像中每个像元所对应的地表, 往往包含不同的地表覆盖类型, 它们有着不同的光谱响应特征。本文进行水质遥感监测时, 对研究区水体进行均匀布点及采样(2006年4月22日), 并在室内对野外样品的水质组分进行了分析, 但因实地采样点和遥感数据的尺度之间存在着差异, 为了更加准确地获取采样点水体的光谱反射率, 提高遥感水质监测的精度, 本文使用波谱“沙漏”向导对混合像元进行分解, 在 ASTER 遥感数据上发现和绘制了地物端元, 分离出混合像元和极值像元, 并提取了研究区水体范围信息, 其处理过程如下:

#### (1) ASTER 数据表观反射率计算及最小噪声分离(Minimum Noise Fraction, MNF)

在使用波谱“沙漏”向导进行混合像元分解时, 输入模型中的数据应是表观反射率数据。本文使用了内部平均相对反射率法(Internal Average Relative Reflectance, IARR)对 ASTER 数据进行了处理, 利用整景影像的平均光谱值去除每个像元的光谱值, 生成表观反射率数据。

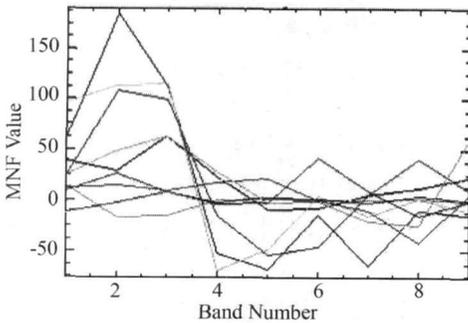


图1 MNF 变换波谱曲线图

最小噪声分离变换实质上是对遥感数据进行含有两次叠置处理的主成分分析, 以便确定遥感影像数据内在的维数, 并分离遥感数据中的噪声, 以减少随后处理时对磁盘空间和运行时间的依赖<sup>[27-28]</sup>。ASTER 遥感数据经过 MNF 变换的各个分量互不相关, 但具有高度的空间一致性, 而噪声在变换后不包含任意空间信息, 从而克服了噪声对应影像质量

的影响, 随着维数增加, MNF 影像(特征影像)各分量包含信息递减(图1, 图2), 第9分量的信息量最小。另外, 特征值和特征影像可用来估计数据的维数, 且从包含信息的波段中获取的特征值将比仅包含噪声的波段的特征值的数量级大<sup>[29]</sup>。

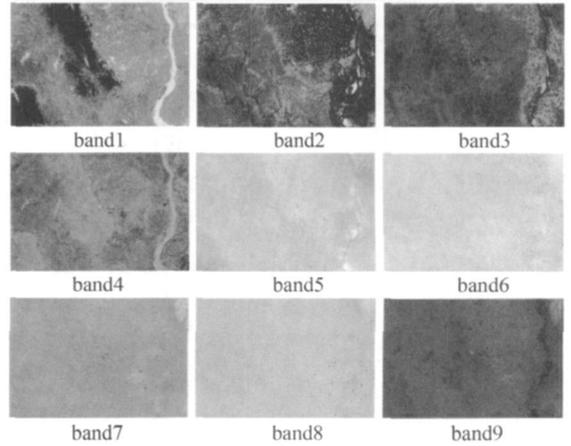


图2 ASTER 数据经 MNF 变换的各特征影像

#### (2) 纯净像元指数(PPI)的生成

纯净像元指数是一种在多光谱和高光谱遥感影像数据中寻找波谱最纯净像元的方法<sup>[29]</sup>。通常, 波谱最纯净的像元与混合的像元相对应。像元纯净指数是通过迭代将 N 维散点图映射为一个随机单位向量, 每次映射的纯净像元被记录下来, 且每个像元被标记为纯净像元的总次数也将记录下来。在纯净像元影像上, 每个像元的 DN 值与像元被标记为纯净像元的总次数是相一致的。

本文在计算纯净像元指数时, 迭代次数(Number of PPI Iterations)设定为 5000, 阈值系数(PPI Threshold Value)设定为 2.5, 运行结果(图3, 图4)表明, 不同的像元值为其本身在运行时的迭代次数, 亮度值大的像元表示采用的光谱极值较多, 光谱比较纯; 相反, 亮度较暗的像元表示采用的光谱极值较少, 光谱纯度比较低。经过分析, 对 PPI 进行密度分割, 生成包含高值的 ROI, 以便在 n Dimensional Visualizer 中交互选取影像的端元。

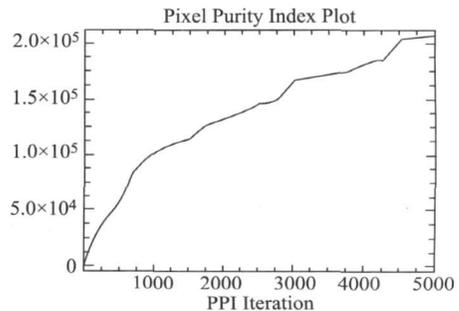


图3 纯净像元指数运算迭代曲线

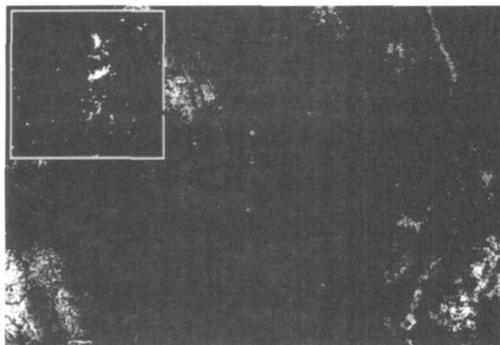


图4 纯净像元指数(PPI)

### (3) 多维显示端元选择

在多维显示时,波谱可看作是 N 维散点图中的点,其中 N 为波段数。在 N 维空间中,点的坐标是由 N 个值所组成,它与给定像素点的相应每个波段中波谱辐射值或反射率值相对应。用户可以根据这些点在 N 维空间中的分布状况来估计波谱端元数以及它们的纯净波谱信号<sup>[28]</sup>。在 ENVI 中, N 维可视化工具(ir Dimensional Visualizer)提供了一个交互式工具,用户可以在 N 维空间中选择所需的端元或通过设定 PPI 阈值来选定极值像元,用其来代表端元波谱。本文对自动分出的端元进行修改,在分类时合并后六类端元为一类(图 5)。

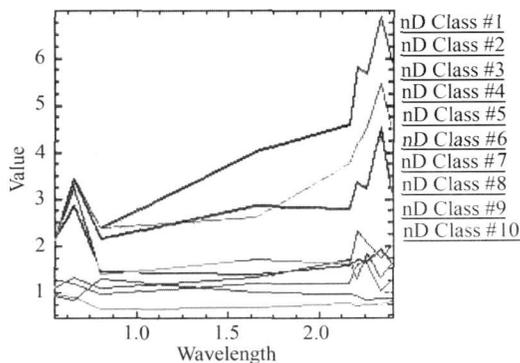


图5 端元的波谱曲线

### (4) 波谱角填图(SAM)

波谱角填图将 ASTER 影像上的地物波谱与端元波谱进行比较,把每种地物波谱看作是向量空间中的向量(向量维度等于波段数),通过计算各地物波谱与端元波谱之间的“波谱角”,确定两者之间的相似性<sup>[10]</sup>,进而根据端元波谱的数量对影像中的地物进行分类,生成最终的结果图(图 6),并提取出研究区水体范围,另外,分类结果也验证了对 ASTER 进行纯净像元指数计算和地物端元选择的正确性。

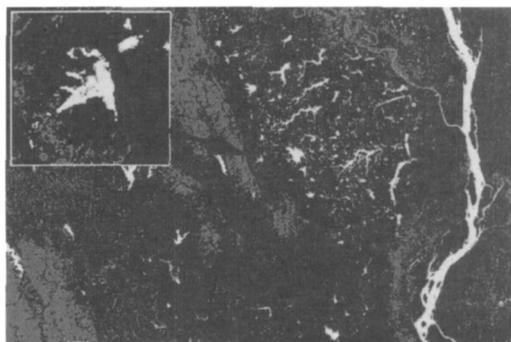


图6 基于端元的波谱角填图分类结果

### 3.4 野外采样点光谱反射率的获取

通过运行波谱“沙漏”模型,本文获得了基于 ASTER 数据的纯净像元指数和水体信息数据,为获得野外实测采样点处的光谱反射率,建立光谱反射率与采样点水质组分之间的联系,需要对 ASTER 大气纠正结果数据、采样点位置数据(GPS 数据)、混合像元分解结果数据进行叠加分析,首先对采样点位置数据和混合像元分解结果数据进行叠加,判断采样点是否处于极值像元中,若处于极值像元中,则极值像元处的光谱反射率值直接取值作为 GPS 点位处的光谱反射率;若处于混合像元中,则对 ASTER 大气纠正结果数据进行局部重采样,利用反距离加权方法计算 GPS 点位处的光谱反射率(见图 7)。

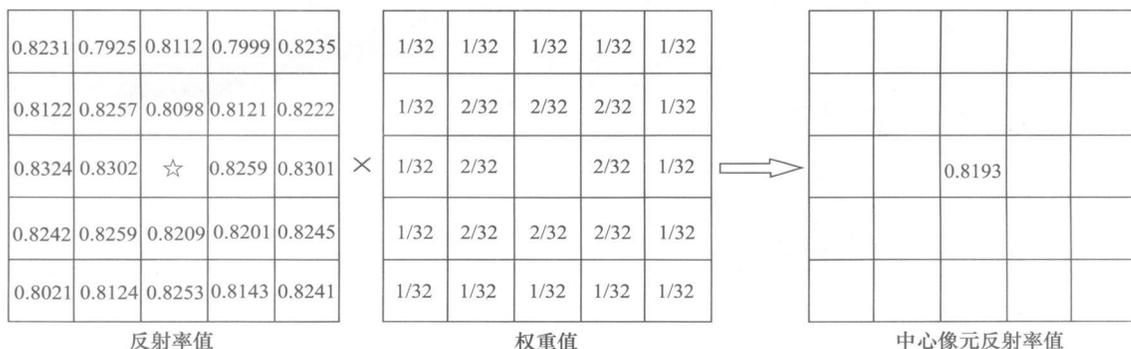


图7 采样点处混合像元的光谱反射率求值方法

利用反距离权重方法计算混合像元的反射率,符合空间自相关的原理,即距离相近的事物越相似。本文利用反距离权重法可有效地对野外采样点处混合像元反射率值进行计算,以满足本次研究的需要,计算公式如下<sup>[29-30]</sup>:

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_{ij})} R_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_{ij})^p}}$$

### 3.5 数据的存储与管理

通过上述对 ASTER 数据进行大气纠正、几何纠正、混合像元分解、采样点处光谱反射率的计算等一系列处理,本文得到了野外采样点纯净像元和非纯净像元的光谱反射率值,同时,把采样点处的地理坐标(GPS 数据)和实测污染物浓度录入到数据库中,统一管理,以便于下文对研究区水质进行快速的分析、预测及评价。

## 4 水质模型的建立、反演及评价

### 4.1 相关性分析

经过多次的试验,文中对  $Mg^{2+}$  浓度与 ASTER 遥感数据的各波段反射率及反射率组合进行了 Pearson 相关分析,结果(见表 1)表明  $Mg^{2+}$  浓度数据与波段 B7 反射率间的相关性比较显著,于是,进一步生成  $Mg^{2+}$  浓度数据与波段 B7 反射率间的散点图(见图 8),并通过散点图来发现数据的分布规律。

表 1 水质组分中  $Mg^{2+}$  浓度与研究波段(或波段组合)反射率的 Pearson 相关性

波段 (或波段组合)	Pearson	波段 (或波段组合)	Pearson
B1	- 0.091	B4/ B3	- 0.136
B2	- 0.016	B4/ B2	0.145
B3	0.315	B3/ B2	0.115
B4	0.721	B3/ B1	0.153
B5	0.746	B2/ B1	0.198
B6	0.788	B1 * B2	- 0.064
B7	0.803	B1 * B3	0.175
B8	0.722	B1 * B4	0.104
B9	0.663	B2 * B3	0.279
B4/b1	0.195	B2 * B4	0.216
B4/ B2	0.145	B3/ B8	0.079

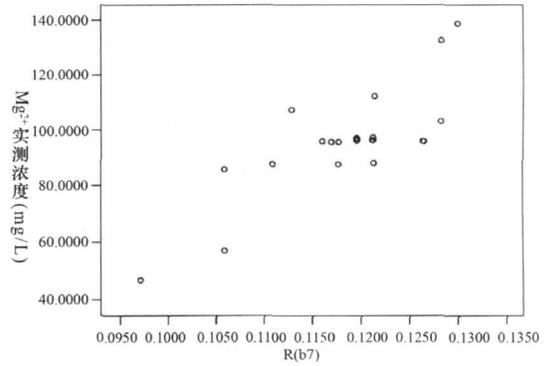


图 8 水质组分中  $Mg^{2+}$  浓度与 B7 间散点图

从上述分析中可知,所有采样点处的  $Mg^{2+}$  浓度数据与波段 B7 间的相关性比较显著,相关系数为 0.803,且从散点图中可以发现,所有采样点处的  $Mg^{2+}$  浓度数据在散点图上趋于线性排列。

### 4.2 反演模型的建立与验证

文中随意抽取了野外 24 个采样点中 15 个采样点的数据进行曲线回归分析(包括线性回归分析),通过对数据处理过程产生的各项参数进行分析,发现  $Mg^{2+}$  浓度与 B7 的线性关系比较显著,15 个采样点  $Mg^{2+}$  浓度的数据与 B7 线性相关性达到 0.779,于是建立  $Mg^{2+}$  浓度与 B7 波段的一元线性回归方程:

$$C_{Mg^{2+}} = 1630.146R(B7) - 99.338$$

其中  $C_{Mg^{2+}}$  为  $Mg^{2+}$  的估测浓度值,  $R(B7)$  为 Aster 数据第 7 波段光谱反射率,相关系数  $R^2 = 0.607$ 。

另外,为确保模型的可行性,文中对  $Mg^{2+}$  浓度模型进行检验。 $Mg^{2+}$  浓度模型的适用性检验是利用未参加建模的 9 个采样点的  $Mg^{2+}$  浓度实测数据对  $Mg^{2+}$  浓度模型进行检验,即:利用已建立的模型计算出该 9 个采样点的  $Mg^{2+}$  浓度估测值,进而分析、建立实测数据与估测数据的关系(图 9),其结果如下:

$$C_{\text{实测数据}} = 1.837C_{\text{估测数据}} - 80.415$$

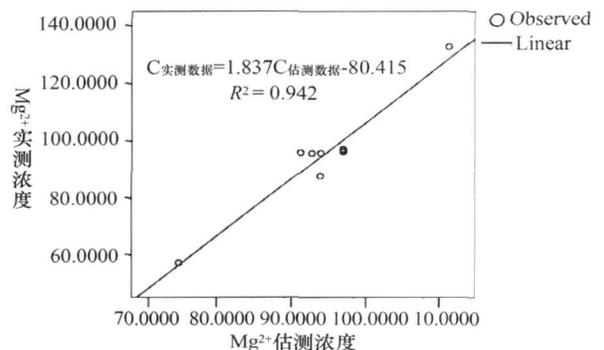


图 9  $Mg^{2+}$  浓度估测模型验证图(单位: mg/L)

其中  $C_{\text{实测数据}}$  为采样点处  $Mg^{2+}$  的实测浓度值,  $C_{\text{估测数据}}$  为  $Mg^{2+}$  的估测浓度值,相关系数  $R^2 = 0.942$ ,

说明  $Mg^{2+}$  浓度的实测浓度和估测浓度间的线性关系达到极显著相关。

#### 4.3 虎山尾矿库水质预测及评价

根据上述建立的  $Mg^{2+}$  浓度反演模型生成了  $Mg^{2+}$  浓度预测值分布图(图 10)。从图上看,浅色区域(即为污染物浓度大的地方)为污染源,且以污染源为中心形成浓度高值区,另外,由于水体的扰动效应,沉积在水体底部的物质溶解,致使从污染源向远处,污染物浓度减小缓慢。另外,在监测过程中,根据生活饮用水水质标准(CJ 3020-1993),其他污染离子浓度也较高,研究区水质已经受到破坏,不能满足居民生产、生活的需要,因此需要对其

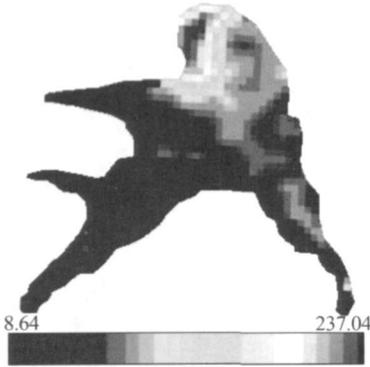


图 10  $Mg^{2+}$  浓度反演分布图(单位:mg/L)

进行治理,否则会严重影响周围人类的生存环境,同时也会对生态平衡造成深远的影响,甚至对下游水体尤其汉水流域水环境的影响。

## 5 结束语

通过研究取得下列成果:

(1)文中对 ASTER 数据进行了大气纠正、几何纠正及波谱“沙漏”分析,对数据进行 MNF 变换,生成纯净像元指数,提取研究区水体信息,实现了对混合像元的分解。同时,根据空间自相关理论对混合像元反射率值进行计算,以提高后期信息模型的精度。

(2)通过 SPSS 生成 ASTER 遥感数据反射率或反射率比值与实测污染物数据间的散点图,经多次试验,对比试验结果,最终建立了实测污染物数据与水体反射率间显著相关的反演模型,进而应用该模型对尾矿库水体污染物进行了浓度分布的反演。

(3)利用所建立的反演模型生成的研究区水质组分浓度分布图显示,污染物的浓度成阶梯状连续分布,污染物的浓度逐渐减少,浓度高的地方即是污染源所在。这与野外调查相符,进一步验证了模型的正确性,故而表明该模型是适用的。

## 参考文献

- [1] Klemas V, Bartlett D, Philopt W, et al. Coastal and estuarine studies with ERTS-1 and Skylab[J]. Remote Sensing Environment, 1974(3): 153- 177.
- [2] Jerlov, N. G. Marine optics[M]. Elsevier Scientific, Amsterdam, 1976.
- [3] Dekker, A. G., Peters, S. W. M.. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: A case study in the Netherlands [J]. Int. J. Remote Sensing, 1993(14): 799- 822.
- [4] Hoogenboom H J, Dekker A G, Althuis U A. Simulation of AVIRIS sensitivity for detecting chlorophyll over coastal and inland waters[J]. Remote Sense Environ, 1998(65): 333- 340.
- [5] 刘灿德,何报寅. 水质遥感监测研究进展[J]. 世界科技研究与进展, 2005(5): 40- 48.
- [6] 吕恒,江南,李新国. 内陆湖泊的水质遥感监测研究[J]. 地球科学进展, 2005(2): 185- 192.
- [7] 尹球,巩采兰,匡定波等. 湖泊水质卫星遥感方法及其应用[J]. 红外与毫米波学报, 2005(6): 198- 205.
- [8] 童小华,谢欢,仇雁翎. 黄浦江上游水域的多光谱遥感水质监测与反演模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006(10): 851- 855.
- [9] 张博,张柏,洪梅等. 湖泊水质遥感研究进展[J]. 水科学进展, 2007(3): 301- 310.
- [10] Baban S M J. Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U K using Landsat imagery[J]. Int. J. Remote Sensing, 1993, 14(7): 1247- 1267.
- [11] 疏小舟,尹求,匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射率光谱特征的关系[J]. 遥感学报, 2000(2): 41- 45.
- [12] 李素菊,王学军. 巢湖水体悬浮物含量与光谱反射率的关系[J]. 城市环境与城市生态, 2003(11): 66- 68.
- [13] 雷坤,郑丙辉,王桥. 基于中巴地球资源 1 号卫星的太湖表层水体水质遥感[J]. 环境科学学报, 2004(5): 376- 380.
- [14] 李云梅,黄家柱,韦玉春,等. 湖泊富营养化状态的地面高光谱遥感分析[J]. 环境科学, 2006(9): 1770- 1775.
- [15] Paredes, J. m., Spero, R. E. Water depth mapping from passive remote sensing data under a generalized ration assumption [J]. Applied Optics, 1983(22): 1134- 1135.

(下转第 85 页)

- [12] 刘昉勋,黄致远.江苏省地带性植被的基本特点与分布规律[J].植物生态学报,1982,6(3):236-245.
- [13] 刘昉勋,黄致远.江苏省植被区划[J].植物生态学报.1987,11(3):226-233.
- [14] 周秀佳.上海的主要自然植被类型及其分布[J].植物生态学报,1984,8(3):189-197.
- [15] 高峻.上海自然植被的特征、分区与保护[J].地理研究,1997,16(3):82-88.
- [16] 刘其霞,常杰,江波.浙江省常绿阔叶生态公益林生物量[J].生态学报,2005,25(9):2139-2144.
- [17] 袁位高,沈爱华,江波,等.浙江省常绿阔叶林凋落物特征研究[J].浙江林业科技,2009,29(3):1-4.
- [18] 陈春根,史军.长江三角洲地区人类活动与气候环境变化[J].干旱气象,2008,26(1):28-34.
- [19] Xu W-T, Wu B-F, Yan G-Z, et al. China land cover 2000 using SPOT VGT S10 data[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(2): 204-214.
- [20] Griguolo S, Mazzanti M. Using a feed-forward neural network to simulate missing values in SPOT/VEGETATION NDVI images[C]//Proceedings of the 2nd International VEGETATION User Conference, Antwerp, 2004: 63-70.
- [21] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, Zhang Z X, Deng X Z. Study on spatial pattern of land use change in China during 1995-2000[J]. Science in China(Series D), 2003, 46(4): 373-384.
- [22] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,等.基于NDVI数据的华北地区耕地物候空间格局[J].中国农业科学,2009,42(2):552-560.
- [23] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time series of satellite sensor data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002(40): 1824-1932.
- [24] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT—a program for analyzing time series of satellite sensor data[J]. Computers and Geosciences, 2004(30): 833-845.
- [25] 于信芳,庄大方.基于MODIS NDVI数据的东北森林物候期监测[J].资源科学,2006,28(4):111-117.
- [26] 温刚,符淙斌.中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征:多年平均结果[J].大气科学,2000,24(5):676-682.
- [27] 温刚,符淙斌.中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征:年际比较[J].气候与环境研究,2001,6(1):1-10.
- [28] 罗洪群.统计学原理[M].成都:电子科技大学出版社,2005.
- [29] 葛全胜,郑景云,张学霞.过去40年中国气候与物候的变化研究[J].自然科学进展,2003,13(10):1048-1053.

(上接第25页)

- [16] Khorram S, Chheshire H M. Remote sensing of water quality in the neusc river Estuary, Rorth Carolina[J]. Photogramm, Eng. Remote sens, 1985, 51(1):53-62.
- [17] 李铁芳.浅海水下地形地貌遥感信息提取与应用[J].环境遥感,1991(2):22-30.
- [18] Tripathi N K, RAO A M. Bathymetric mapping in Kakinada Bay, India, using RS ID LISS-III data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(6): 1013-1025.
- [19] 胡雯,杨世植,翟武全,等.NOAA卫星监测巢湖蓝藻水华的实验分析[J].环境科学与技术,2002(1):16-19.
- [20] 汪溪远,师庆东,潘晓玲,等.遥感技术在西部干旱区湖泊水质环境监测中的应用[J].农业科学研究,2005(3):71-75.
- [21] 陈晓玲,袁中智,李毓湘,等.基于遥感反演结果的悬浮泥沙时空动态规律研究——以珠江河口及邻近海域为例[J].武汉大学学报信息科学版,2005(8):677-681.
- [22] 方圣辉,张加晋.不同泥沙含量水体光谱特性分析[J].测绘信息与工程,2007,32(6):47-49.
- [23] 刘茜,David G Rossiter.基于高光谱数据和MODIS影像的鄱阳湖悬浮泥沙浓度估算[J].遥感技术与应用,2008(2):7-12.
- [24] 宋晓宇,王纪华,刘良云,等.基于高光谱遥感影像的大气纠正:用AVIRIS数据评价大气纠正模块FLAASH[J].遥感技术与应用,2005(8):393-398.
- [25] 吕凤军,郝跃生,李川平,等.基于FLAASH模块的遥感数据大气校正应用研究[J].河北地质,2007(2):23-26.
- [26] 顾海燕,李海涛,杨景辉.基于最小噪声分离变换的遥感影像融合方法[J].国土资源遥感,2007(2):53-55.
- [27] 杜博,张良培,李平湘,等.基于最小噪声分离的约束能量最小化[J].中国图象图形学报,2009,14(9):1850-1857.
- [28] 李小娟,宫兆宁,刘晓萌,等.ENVI遥感影像处理教程[M].中国环境科学出版社,2007,2.
- [29] 邬伦,刘瑜,张晶,等著.地理信息系统——原理、方法和应用[M],科学出版社,2005,1.
- [30] 高歌,龚乐冰,赵珊珊,等.日降水量空间插值方法研究[J].应用气象学报,2007(10):732-736.