

基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究

郭宇龙¹ 李云梅^{1*} 朱利² 徐德强³ 李渊¹ 檀静¹ 周莉¹ 刘阁¹

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046; 2. 环保部卫星环境应用中心, 北京 100029; 3. 宜兴市水文水资源监测中心, 宜兴 214200)

摘要: 遥感影像高光谱重构可以从较少的光谱波段还原出丰富的高光谱信息, 为水环境遥感提供更加适用的数据源, 对内陆水体水色遥感具有重要意义. 利用 2009 年 6 月 13 日获取的 HJ1A-HSI 和 HJ1A-CCD 数据, 构建 HJ1A-CCD 数据的高光谱重构模型. 重构结果表明: ①与地面实测数据相比, 重构数据和 HJ1A-HSI 数据在 660 ~ 900 nm 波长范围内的平均相对误差分别为 0.305 1 和 0.337 7; ②重构影像信息熵和平均梯度都高于 HJ1A-HSI 影像. 此外, 分别利用 HJ1A-HSI 数据和重构数据建立叶绿素 a 浓度的三波段反演模型, 发现重构数据能得到更高的反演精度.

关键词: 巢湖; HJ1A-CCD 数据; HJ1A-HSI 数据; 高光谱重构; 叶绿素 a

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0069-08

Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data

GUO Yu-long¹, LI Yun-mei¹, ZHU Li², XU De-qiang³, LI Yuan¹, TAN Jing¹, ZHOU Li¹, LIU Ge¹

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Satellite Environment Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China; 3. Yixing Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Yixing 214200, China)

Abstract: By restoring plentiful spectral information from several bands, hyperspectral image reconstruction could provide more suitable data source to water environment remote sensing. This is significant for inland water color remote sensing. By using the HJ1A-HSI and HJ1A-CCD image acquired on June 6th, 2009, the hyperspectral data was reconstructed from HJ1A-CCD data. The results show that: ①The average relative error of HJ1A-HSI data and reconstructed data compared with measured Rrs at 660 nm-900 nm are 0.333 5 and 0.307 7, respectively; ②The entropy and average gradient of reconstructed image are higher than HJ1A-HSI image. In additional, the three band model get higher accuracy when inverting chl-a concentration by the reconstructed data.

Key words: Chaohu Lake; HJ1A-CCD data; HJ1A-HSI data; hyperspectral reconstruction; chlorophyll-a

目前, 在内陆水环境遥感监测中应用较多的数据源是宽波段遥感数据源^[1-3], 但较宽的波段宽度往往模糊了水色的一些光谱特征, 从而影响了水色要素的反演精度^[4]. 此外, 大部分内陆湖泊水体光学特性复杂, 具有较大的空间差异性^[5-7], 因此, 需要具有较高空间分辨率的遥感数据. 但由于硬件条件的限制, 高空间分辨率和高光谱分辨率很难共存于同一传感器, 这对内陆湖泊水环境参数的卫星影像反演产生了一定的限制.

目前, 针对多源传感器数据进行影像融合, 以提高图像的空间分辨率或光谱分辨率的方法已有很多, 如基于快速 IHS 变换^[8]、小波变换^[9]以及小波比值^[10]的图像融合方法. 但是, 这些方法往往对原始的光谱信息造成了较大影响, 对于水体这种弱信息源而言, 其光谱信息的损失不利于水环境参数的定量提取.

我国于 2008 年 9 月发射了专门用于环境监测的环境减灾卫星, 可以同时获取高光谱数据和多光谱数据. 其中, 高光谱数据(HJ1-HSI 数据)拥有 115

个波段, 光谱分辨率高达 5 nm^[11], 空间分辨率为 100 m. 多光谱数据(HJ1-CCD 数据)虽然空间分辨率为 30 m, 却只有 4 个波段, 其 4 个波段范围分别为 430 ~ 520、520 ~ 600、630 ~ 690 和 760 ~ 900 nm. 本研究尝试利用同步获取的 HJ1A-CCD 数据和 HJ1A-HSI 数据, 分析了多光谱数据进行重构获取高光谱数据的方法, 以期获得具有较高空间分辨率和光谱分辨率的数据, 为水环境遥感新的数据源的建立提供方法参考.

收稿日期: 2012-03-20; 修订日期: 2012-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971215); 江苏省 2011 年度普通高校研究生科研创新计划立项项目(CXLX11_0880); 江苏省高校自然科学基金研究重大项目(11KJA170003); 江苏高校优势学科建设工程项目(1411109012); 国家自然科学基金项目(41171269); 江苏省 2012 年度普通高校研究生创新计划项目(CXZZ12-0397)

作者简介: 郭宇龙(1988 ~) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境遥感. E-mail: gyl.18@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域

以巢湖为研究区(图1)。巢湖位于安徽省境内,属长江下游左岸水系,东西长54.5 km,南北平均宽度15.1 km,平均水深4.5 m,面积820 km²。近年来,随着沿湖经济的发展,工、农业废水及生活污水的排放,导致巢湖水体污染日益严重,已经直接影响到人们正常的生产与生活^[12]。

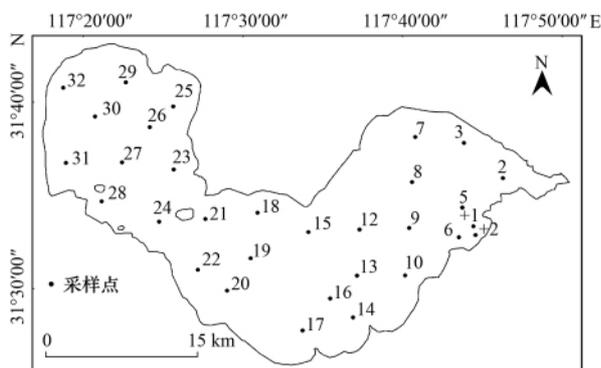


图1 巢湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling stations

1.2 实验数据获取

2009年6月13~16日对巢湖进行了星-地同步实验,共设置32个采样点如图1所示,对每个采样点进行了水体遥感反射率的测量,同时采集表层水样放入冷藏箱,并于当日送回实验室进行叶绿素浓度分析。

水体反射光谱的测量采用美国ASD公司生产的ASD FieldSpec Pro便携式光谱辐射计,其波段范围为350~1050 nm。为减少水体镜面反射和船体自身阴影的影响,测量时采用唐军武等^[13]提出的内陆二类水体水面以上光谱测量的方法。提取遥感反射率时需要测量的数据包括标准灰板、天空光、水体等的光谱辐亮度信息,每个对象都要采集10条以上的光谱数据,剔除异常光谱数据,剩余数据做均值处理。遥感反射率提取的具体方法见文献^[14]。

叶绿素a浓度的测定采用热乙醇法测量,即对采集的水样进行抽滤、研磨、离心、定容后在分光光度计上分析得出该样点的Chl-a浓度^[15]。

遥感影像为2009年6月13日同步获取的HJ1A-CCD数据和HJ1A-HSI数据。

1.3 卫星影像处理

1.3.1 几何校正

以经过几何精校正的TM影像为基准影像(投

影为UTM,椭球体为WGS84),以最近邻像元法为重采样方法进行几何校正,并将RMS值控制在0.1个像元之内。

1.3.2 大气校正

采用文献^[16]中的大气校正算法进行大气校正。该算法首先选取与卫星过境时间最为接近的样点实测反射率数据作为无大气影响的真值,然后将由卫星数据得到的大气顶层反射率与实测反射率的差值作为大气的贡献值,在假设卫星数据获取瞬间巢湖上空大气状况一致的情况下,将遥感影像中每个像元减去大气的贡献值,得到无大气影响的反射率图像,再进一步获得各像元的遥感反射率。该算法的表达式如下:

$$R_{\text{TOA}}(\lambda)_{\text{HJ-1}} - R_{\text{TOA}}(\lambda)_{\text{field}} = AC(\lambda) \quad (1)$$

$$R_{\text{TOA}}(\lambda)_{\text{HJ-1}} = \frac{\pi L_{\text{TOA}}(\lambda)}{F_0(\lambda) \cos(\theta_0)} \quad (2)$$

式中 $R_{\text{TOA}}(\lambda)_{\text{HJ-1}}$ 为环境一号卫星数据大气顶层反射率,可由公式(2)计算得到; $R_{\text{TOA}}(\lambda)_{\text{field}}$ 为实测反射率,可由实测遥感反射率求得; $AC(\lambda)$ 为波长 λ 处大气贡献值; $L_{\text{TOA}}(\lambda)$ 为波长 λ 处的大气顶层辐亮度; $F_0(\lambda)$ 为波长 λ 处的大气层外太阳辐照度; θ_0 为卫星过境时的太阳天顶角。本实验中,32号点位采样时间为11:04,和卫星过境时间11:40最为接近,因此将32号点位作为基准点,以其大气层外的反射率计算AC,得到各个波段的大气贡献率,之后逐点进行大气校正。

1.4 高光谱重构方法

参照文献^[17]的研究,建立多元线性回归模型,对HJ1A-CCD数据进行高光谱重构,其表达式如下:

$$R(\lambda) = b_0(\lambda) + \sum_{(i=1,4)} [b_i(\lambda) R(\mu_i)] \quad (3)$$

式中 $R(\lambda)$ 为重构的高光谱遥感反射率, λ 为中心波长, λ 取值在460~952 nm之间,参照HJ1A-HSI数据波段设置; $b_0(\lambda)$ 为常数项; $b_i(\lambda)$ 为第 i 个自变量的线性拟合系数; $R(\mu_i)$ 为多光谱数据第 i 个波段遥感反射率,在本研究中 μ_1, \dots, μ_4 为HJ1A-CCD数据4个波段的中心波长位置。

在HJ1A-HSI影像上随机均匀取点50个(避开水华区),以这些点位上的遥感反射率作为建模数据集,对 $b_0(\lambda)$ 、 $b_1(\lambda)$ 、 $b_2(\lambda)$ 、 $b_3(\lambda)$ 、 $b_4(\lambda)$ 这5个参数进行最小二乘拟合,即可得到波段 λ 处的光谱重构表达式,逐波段拟合之后共得到115个重构表达式。最后将HJ1A-CCD影像数据4个波段的

影像带入每个波段的重构模型,即得到同时具有 115 个波段和 30 m 空间分辨率的重构影像。

要成功使用该方法的重要前提是每个自变量都能与因变量有较高的相关性,在此,对该条件进行检验。

HJ1A-CCD 数据的 4 个波段中心波长分别是 475、560、660 和 830 nm,于是提取 HJ1A-HSI 影像上对应 50 个随机点的所有波段值,计算 4 个自变量波段 B8、B40、B68、B100(对应中心波长分别是 476.22、560.32、662.72 和 834.265 nm)中每个波段和其余各个波段的相关系数,其结果如图 2 所示。

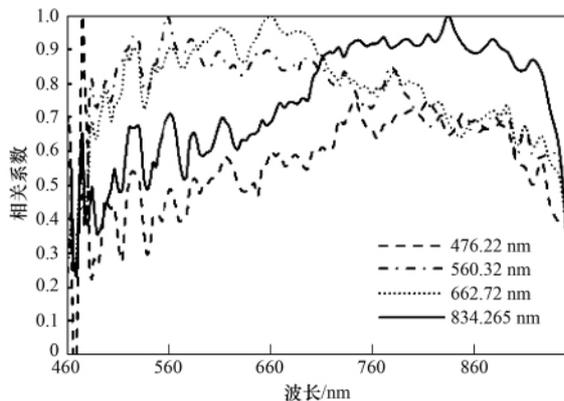


图 2 4 个波段和其余波段的相关性

Fig. 2 Correlation between each of the four bands and the others

从图 2 可以看出,476.22 nm 波段在整体波段区间内,与其余波段的相关系数都不高,除了在自变量波段(476.22 nm) 460~952 nm 光谱范围内相关系数最高值 0.77 出现在 743 nm 附近,而 460~500 nm 之间相关系数普遍低于 0.6,出现这种情况的原因是从图像上看,HJ1A-HSI 数据前 15 个左右的波段影像上会有规则暗条带,由此判断这部分光谱波动跟传感器在这个波段区间的数据信噪比有很大关系;560.32 nm 和 662.72 nm 波段的相关系数曲线变化较为一致,都与 500~700 nm 波段之间遥感反射率有较高的相关性,在 700 nm 之后逐渐降低;834.265 nm 波段相关系数曲线与 560.32 nm、662.72 nm 波段呈相反的趋势,在 700 nm 之前相关系数比较低且随波长增加不断增加,直到 720 nm 左右稳定在 0.9 附近;所有 4 个波段的相关系数曲线在 910 nm 附近都有一个明显的下滑,因为这部分光谱远离了所有 4 个自变量。分析结果表明,HJ1A-HSI 数据中 3 个自变量波段与其附近波段范围内的光谱数据都有很高的相关性,而且 4 条相关系数曲线的高值区几乎覆盖了 460~900 nm 的波段范围,

因此,多元线性回归模型对 HJ1A-CCD 数据的高光谱重构是可行的。

1.5 叶绿素 a 浓度反演方法

采用三波段模型反演叶绿素 a 浓度^[18,19],其基本模型如下:

$$\text{Chl-a} \propto [R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3) \quad (4)$$

该模型以生物光学模型为基础,使用 3 个特征波段的组合,利用统计的方法反演叶绿素 a 浓度。与传统的经验模型相比,它具有严谨的理论推导和清晰的物理涵义;同时,模型中不涉及任何固有光学参数,因而比生物光学模型更容易应用和推广。该模型已在一些内陆湖泊和海湾中得到了应用,如 Gitelson 等^[20]和徐京萍等^[21]分别利用三波段模型在美国 Chesapeake 湾和吉林新庙泡湖进行叶绿素 a 反演,均取得了较好的效果;杜聪等^[22]尝试利用 Hyperion 高光谱数据成功建立了太湖叶绿素 a 浓度反演的三波段模型。三波段模型参照文献[18,19]的方法建立。

2 高光谱重构结果

通过 1.4 节的分析,确定以 HJ1A-HSI 数据中心波长为 475.11、558.785、662.72 和 834.265 nm 的 4 个波段作为自变量波段,其余各个波段作为因变量,代入式(3)建立逐波段的多元线性回归模型,之后用 HJ1A-CCD 数据的 4 个波段作为 4 个输入变量,输入各个波段的重构模型,得到同时具有 30 m 空间分辨率和 115 个波段的重构影像。

从 3 个方面对高光谱数据重构的效果进行评价:首先,对比重构高光谱数据、HJ1A-HSI 数据两个数据集与地面实测遥感反射率数据集之间的平均相对误差,误差更小的一组被视为更接近实际情况的一组。其次,用信息熵和平均梯度等指标评价影像质量,认为清晰度更高,信息量更大的影像更接近真实情况。最后,为评价模型的稳定性,增加光谱重构模型建模时随机取点的个数,分别以 60、70、80、90、100 个随机点建模,并对比重构结果。

2.1 光谱误差分析

2009 年 6 月太湖野外实验共有 32 个采样点,其中 18、19、25、30、32 这 5 个采样点在图像上的水华暴发区,测量结果也表明这些采样点光谱曲线明显异于其它采样点,因此这些样点不参与讨论,只对剩余的 27 个采样点数据进行对比。取其中 7 号点的 HJ1A-CCD 数据、HJ1A-HSI 数据、重构数据和地面实测数据光谱如图 3 所示。

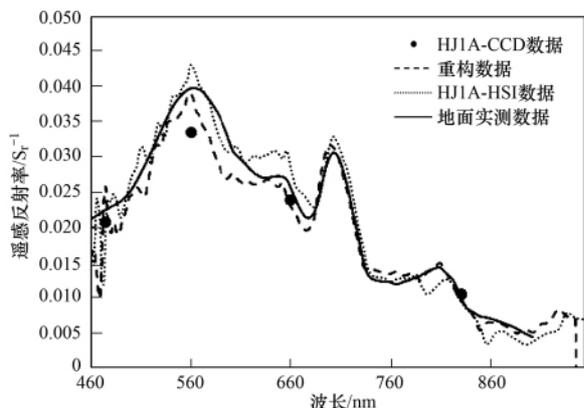


图 3 7 号样点高光谱重构效果

Fig. 3 Effect of the reconstruction of data from sampling station 7

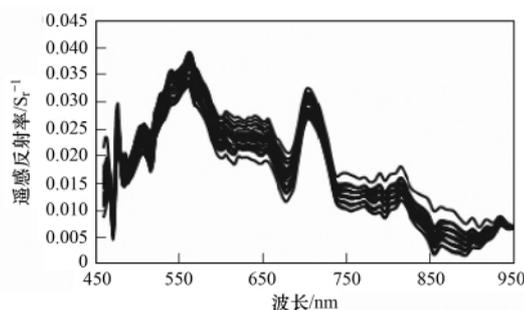
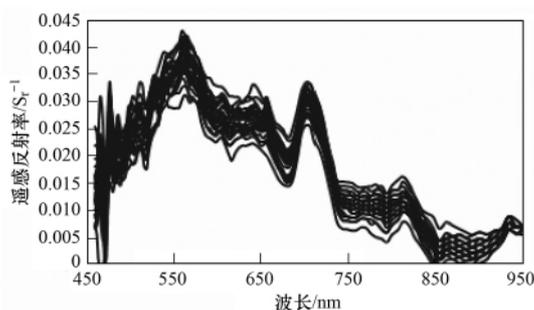


图 4 重构遥感反射率与实测遥感反射率曲线对比

Fig. 4 Comparison of reconstructed Rrs and measured Rrs

的遥感反射率曲线和 HJ1A-HSI 影像的遥感反射率曲线十分相似,同时平滑了一些急剧变化的区域,如 470 nm 之前的光谱曲线,重构影像光谱比 HJ1A-HSI 光谱平滑。

根据上文分析, HJ1A-CCD 数据的第一波段范围内对应的 HJ1A-HSI 数据信噪比过低,而第二波段由于覆盖了对应的 HJ1A-HSI 数据反射峰,反射率值偏小,导致重构数据普遍偏小,因此这两个波段范围内的重构数据不参与误差评估。分别计算两组数据 660 ~ 900 nm 的遥感反射率与地面实测遥感反射率的平均相对误差,得到每个采样点的精度如图 5 所示。图 5(a) 表明,除了少数几个采样点外,在大

部分采样点,重构光谱的误差都是比较小的。图 5(b) 是两个数据集误差的散点图,可见大部分点位于 1:1 线右侧,对散点做过原点的线性拟合,得到的直线斜率为 0.674 7,说明重构影像与地面实测光谱的平均相对误差更小。

从所有点位的平均值来看,重构数据的平均相对误差为 0.305 1,而 HJ1A-HSI 数据的平均相对误差为 0.337 7,重构数据与地面实测数据的误差小于 HJ1A-HSI 数据。进一步说明重构光谱在这些点位上更加接近地面实测遥感反射率。

2.2 重构质量评价

从影像上看,重构数据与 HJ1A-HSI 数据相比

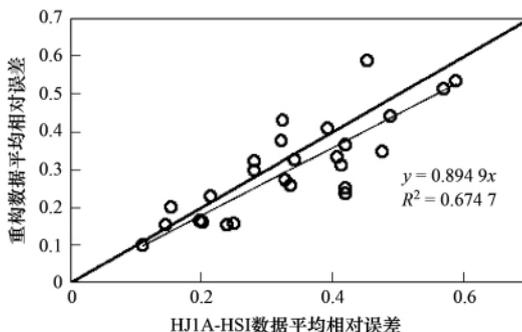
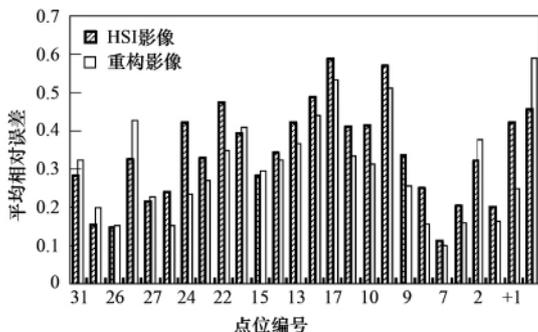


图 5 两组数据的平均相对误差比较

Fig. 5 Comparison of the average relative error of the two datasets

具有一些明显的优势. 为了更好地对比水体信息, 分别取预处理之后的 HJ1A-HSI 影像与重构影像的 560.32、662.72 和 834.265 nm 波段数据作为红、绿、蓝波段进行假彩色合成, 如图 6 所示.

从整体上看, 两幅假彩色合成图像中, HJ1A-HSI 影像有不规则的条带噪声, 呈东北-西南方向分布, 贯穿整个巢湖湖区. 而重构影像条带明显减少, 这是因为作为模型的输入变量, HJ1A-CCD 数据在空间上具有更高的数据质量, 噪声较少, 并将这种优势保持到输出变量, 也就是重构影像中. 其次, 右侧的局部图是左侧图中巢湖中部附近区域放大得到, 重构影像中间部分可以看到一条比较明显的航道, 而在 HJ1A-HSI 数据中几乎不可辨, 说明光谱重构的过程可以很好地保持 HJ1A-CCD 数据的空间分辨率, 使重构影像清晰度更高.

从量化角度来看, 图像处理领域中常用信息熵和平均梯度两个指标来衡量两组图像的信息含量和清晰度, 以此判断图像质量^[23-25]. 信息熵和平均梯度的计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (5)$$

$$g = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{[F(i, j) - F(i+1, j)]^2 + [F(i, j) - F(i, j+1)]^2}}{(M-1)(N-1)} \quad (6)$$

式中, M 代表影像的总列数, N 代表影像的总行数, i 和 j 分别代表特定像元的列数和行数, F 代表 i, j 处的像元值.

分别计算 HJ1A-HSI 影像和重构影像每个波段的信息熵和平均梯度, 用来描述两幅影像的信息量和清晰程度, 计算得到结果如图 7 和图 8 所示.

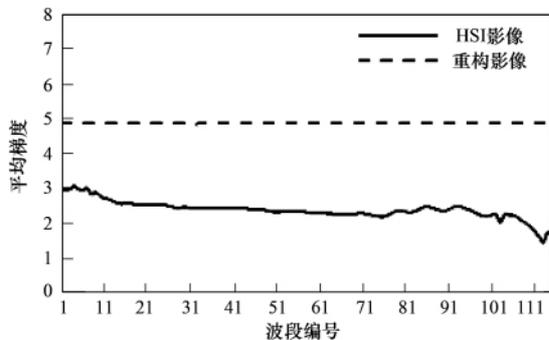


图7 重构高光谱数据与 HSI 数据每个波段的信息熵
Fig. 7 Coentropy of reconstructed data and HSI data

对比结果表明, HJ1A-HSI 数据每个波段的信息熵在 2.5 左右, 平均值 2.4, 并且不同波段的信息熵在第 1~10 波段和第 80 波段之后这两个区间内有一些波动; 而重构影像每个波段的信息熵十分接

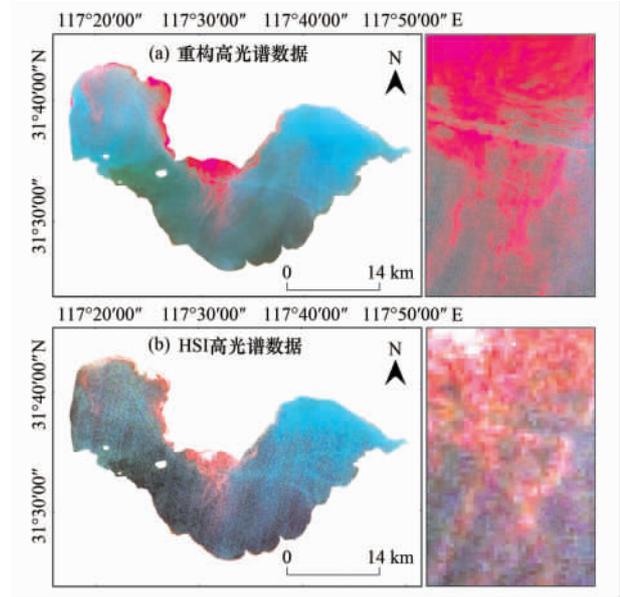


图6 重构高光谱数据与 HJ1A-HSI 数据假彩色合成图像对比
Fig. 6 Comparison of FCC images of reconstructed data and HJ1A-HSI data

式中, n 代表影像中像素值的个数, P_i 代表影像中第 i 个像素值所拥有的像元数. 平均梯度计算公式如下:

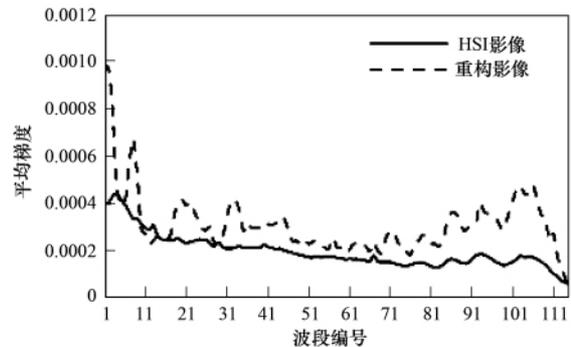


图8 重构高光谱数据与 HSI 数据每个波段的平均梯度
Fig. 8 Average gradient of reconstructed data and HSI data

近, 平均值为 4.89. 总之, 重构影像每个波段的信息熵都要高于 HJ1A-HSI 影像, 说明重构影像包含更丰富的信息. 从平均梯度来看, 重构影像和 HJ1A-HSI 影像在第 1~115 波段的变化趋势是相似的, 但是重构影像的平均梯度在几乎所有的波段都高于 HJ1A-HSI 影像, 从量化角度说明重构影像具有更高的清晰度.

2.3 重构模型稳定性评价

为了验证该重构模型的稳定性, 增加 5 次实验. 在 HJ1A-HSI 影像数据上分别取 60、70、80、

90、100 个随机点的遥感反射率数据作为建模数据集,用 1.4 节中所述的方法对模型的 5 个参数进行拟合,得到五组逐波段的重构模型. 最后计

算 115 个波段的 5 个拟合系数(b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 和 b_4),对所有 6 次实验的模型系数进行统计,得到图 9.

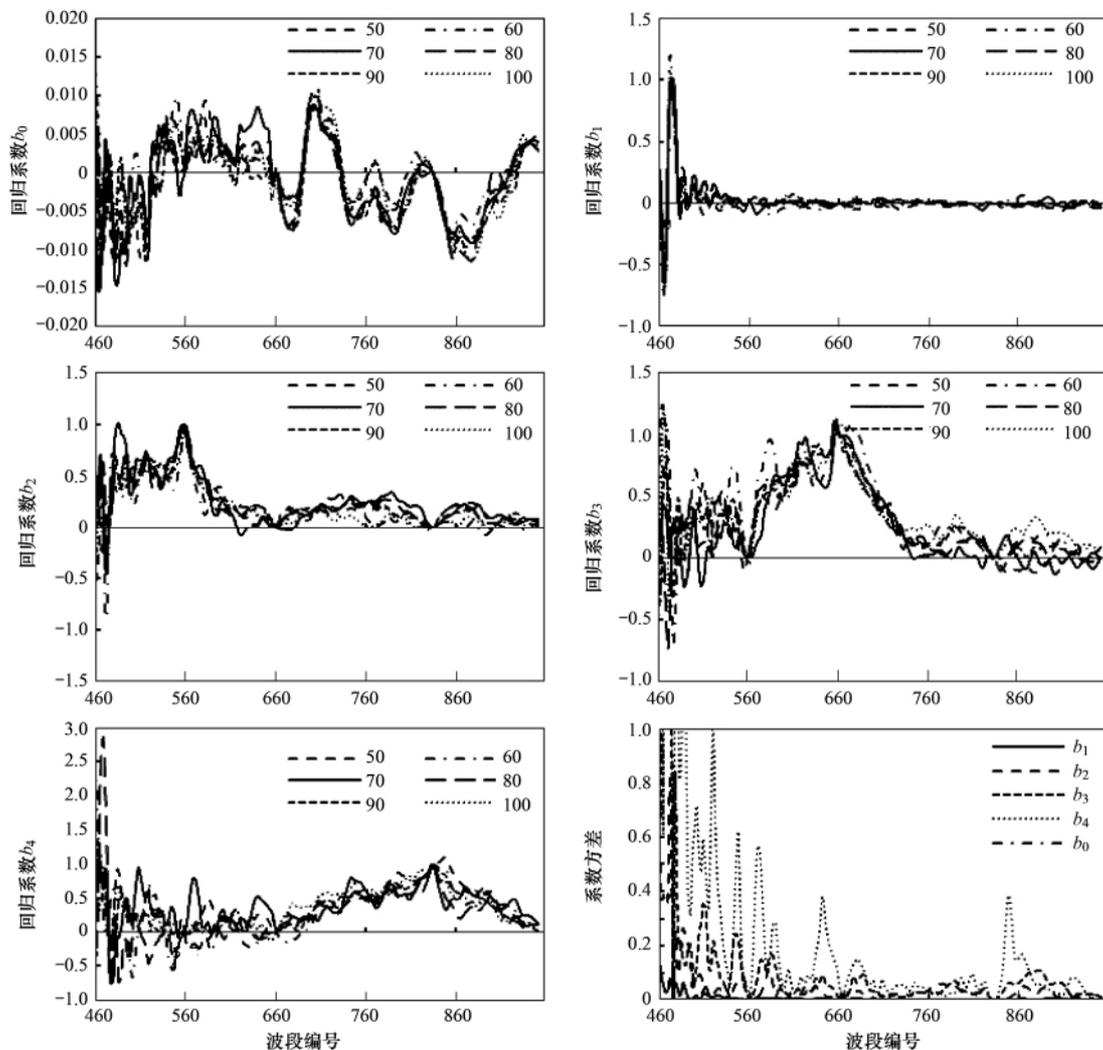


图 9 5 个模型的系数对比

Fig. 9 Comparison of factors of the 5 models

图 9 中前 5 个曲线图列出了 6 次实验中得到的模型拟合系数; 最后一个曲线图表示 5 个拟合系数在 6 次实验中的方差,可见除了 b_4 在 860 nm 附近的一个约 10 nm 宽的高值区外,5 个系数的方差曲线在 660 ~ 952 nm 波段之间大体都在 0.1 以下,而在 460 ~ 660 nm 波段范围内,5 个系数的方差值都普遍较高,并且波动较大. 说明重构算法在 460 ~ 660 nm 波段范围内稳定性较差,在 660 ~ 952 nm 波段范围内稳定性比较好,对随机样点的依赖性不大. 最后计算得到重构结果在 660 ~ 900 nm 之间与地面实测光谱的平均相对误差,发现在增加的 5 次实验中,重构影像波段之间与地面实测遥感反射率之间的平均相对误差分别为 0.313 1、0.317 9、0.327 1、

0.327 1、0.314 7,变化很小,且均小于 HJ1A-HSI 影像的 0.337 7,进一步说明光谱重构模型的稳定性.

3 应用重构影像反演叶绿素 a 浓度

利用重构的影像及三波段模型对叶绿素 a 浓度进行反演,反演精度采用均方根误差(RMSE)进行评价:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (x_n - y_n)^2}{n - 1}} \quad (7)$$

式中 x_n 代表 x 中的第 n 个数据, y_n 代表 y 中的第 n 个数据, n 是样本个数. 在本研究中, y 为实测叶绿素 a 浓度, x 为参与评价的预测叶绿素 a 浓度.

对 HJ1A-HSI 数据和重构数据分别建立三波段

反演模型,并计算模型 R^2 、反演结果与实际测量值之间的 RMSE,得到结果如表 1 所示。

表 1 根据两组数据构建的模型精度对比

项目	表达式	R^2	RMSE
HSI 数据	$357.52x + 152.23$	0.789 2	13.625 36
重构数据	$4385.6x + 149.72$	0.803 1	11.232 19

由表 1 可以看出,与 HJ1A-HSI 数据相比,基于重构数据建立的三波段模型能得到比较高的建模 R^2 和比较低的 RMSE,说明利用多元线性回归模型对高光谱重构这种方法能够结合 HJ1A-CCD 数据和 HJ1A-HSI 数据的优势,得到更适宜于内陆二类水体叶绿素 a 浓度反演的数据源。图 10 所示为基于重构影像和三波段模型得到的巢湖全湖叶绿素 a 浓度分布情况。

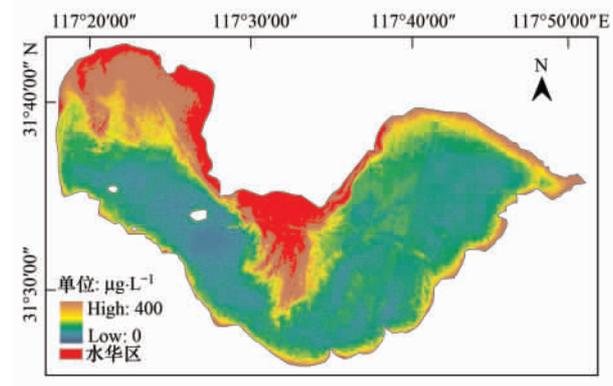


图 10 叶绿素浓度空间分布情况
Fig. 10 Spatial distribution of Chl-a

可以看到 2009 年 6 月 13 日巢湖叶绿素 a 浓度在湖区和湖区西北部偏高,并且这两个区域出现大量蓝藻水华暴发。其余部分靠近湖岸的地区浓度偏高,大部分浓度集中在 $70 \sim 80 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。与杨煜等^[11]的研究结果相比,虽然叶绿素 a 浓度分布情况相似,但本研究得到的结果明显更清晰,叶绿素 a 空间分布更加明确。

4 结论

(1) 用 660 ~ 900 nm 波长之间的重构数据、HJ1A-HSI 数据与地面实测 R_{rs} 数据进行对比分析,结果表明重构数据更加接近地面实测数据。

(2) 通过信息熵和平均梯度两个量化指标,对比了重构影像和 HJ1A-HSI 影像的各个波段数据,发现重构影像具有更大的信息量和清晰度。

(3) 分别用重构数据和原始 HJ1A-HSI 数据建

立叶绿素 a 浓度的三波段模型,结果表明,重构影像数据在建模时能得到更高的 R^2 ,并且反演的 RMSE 更小,与 HJ1A-HSI 影像相比,重构影像可以作为内陆二类水体叶绿素 a 浓度反演更好的数据源。

致谢:感谢参加 2009 年 6 月巢湖野外实验的各位同学,感谢刘忠华在论文数据处理中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 唐军武,马超飞,牛生丽,等. CBERS-02 卫星 CCD 相机资料量化反演水体成分初探[J]. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2005, 35(增刊 I): 156-170.
- [2] 赵冬至,曲元,张丰收,等. 用 TM 图像估算海表面叶绿素浓度的神经网络模型[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(1): 16-21.
- [3] Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer and IRS-1C satellite data in the Mecklenburg lake district, Germany [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73(2): 227-235.
- [4] 孙德勇,李云梅,王桥,等. 基于实测高光谱的太湖水体悬浮物浓度遥感估算研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(2): 124-128.
- [5] 乐成峰,李云梅,孙德勇,等. 基于季节分异的太湖叶绿素浓度反演模型研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 473-480.
- [6] 周冠华,唐军武,田国良,等. 内陆水质遥感不确定性: 问题综述[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 150-157.
- [7] 马荣华,唐军武,段洪涛,等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. 湖泊科学, 2009, 21(2): 143-158.
- [8] Choi M J. A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(6): 1672-1682.
- [9] 袁华,章皖秋. 基于小波变换遥感图像融合技术研究[J]. 电脑知识与技术, 2011, 7(2): 421-423.
- [10] 王建强,吴连喜. 小波变换保持光谱特型融合算法[J]. 测绘科学, 2010, 35(5): 120-122.
- [11] 杨煜,李云梅,王桥,等. 基于环境一号卫星高光谱遥感数据的巢湖水体叶绿素 a 浓度反演[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 495-503.
- [12] 孙德勇,李云梅,王桥,等. 巢湖水体散射和后向散射特性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1428-1434.
- [13] 唐军武,田国良,汪小勇,等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.
- [14] 唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 1999. 107-110.
- [15] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 550-552.
- [16] Freitas F H. Spectral merging of MODIS/MERIS ocean colour data to improve monitoring of coastal water processes [D]. Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009. 15-19.
- [17] Schmeltz M, Froidefond J M, Jourdin F, et al. Remote sensing reflectance reconstruction to obtain water optical properties from

- MERIS multi-spectral satellite images [J]. Remote Sensing of the Coastal Ocean, Land, and Atmosphere Environment, 2010, **7858**: 1-10.
- [18] Dall'Olmo G, Gitelson A A, Rundquist D C. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters [J]. Geophysical Research Letters, 2003, **30**(18): 1-4.
- [19] Dall'Olmo G, Gitelson A A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results [J]. Applied Optics, 2005, **44**(3): 412-422.
- [20] Gitelson A A, Schalles J F, Hladik C M. *et al.* Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: chesapeake Bay case study [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, **109**(4): 464-472.
- [21] 徐京萍, 张柏, 宋开山, 等. 基于半分析模型的新庙泡叶绿素 a 浓度反演研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2008, **27**(3): 197-202.
- [22] 杜聪, 王世新, 周艺, 等. 利用 Hyperion 高光谱数据的三波段法反演太湖叶绿素 a 浓度 [J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2904-2910.
- [23] 张元, 钟兴, 金光, 等. 基于 CCD 阵列错排的图像差分超分辨重建方法 [J]. 液晶与显示, 2011, **26**(6): 841-846.
- [24] 倪翠, 关泽群, 林怡. 基于传感器光谱特性与分类的遥感图像融合 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, **39**(12): 1860-1870.
- [25] 张生, 赵春三, 杨桃. 多光谱与高光谱分辨率图像融合方法比较研究 [J]. 遥感应用, 2007, (5): 56-61.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2012年12月7日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续11次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。