

基于高光谱图像解混的海洋绿藻检测算法

潘斌¹, 张宁², 史振威¹, 谢少彪³

(1. 北京航空航天大学 宇航学院 图像处理中心, 北京 100191;
2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 3. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘要: 提出了一种基于线性混合模型的高光谱图像绿藻面积估计算法。利用端元提取算法, 自动获取图像中绿藻端元的光谱曲线, 根据得到的端元及原始图像, 通过全约束最小二乘算法, 求得绿藻端元的丰度图, 丰度图作为绿藻面积的估计结果。算法能够有效克服由于高光谱图像分辨率不足造成的绿藻面积估计不准确的问题, 实现亚像素水平的绿藻面积估计。利用 2013 年 6 月 29 日获取的 GOCI 传感器获取的 8 波段光谱图像展开实验, 计算得到当日绿藻覆盖面积为 321 km², 与 HJ-1B 卫星的实测结果高度接近, 相比于 NDVI 等传统算法具有明显优势。方法为绿藻灾害预警和监测提供了一条新的解决思路和技术途径, 具有较高的应用价值。

关键词: 高光谱图像; 光谱解混; 绿藻检测

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0823001

Green algae detection algorithm based on hyperspectral image unmixing

Pan Bin¹, Zhang Ning², Shi Zhenwei¹, Xie Shaobiao³

(1. Image Processing Center, School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;
3. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: An green algae area estimation algorithm for hyperspectral image based on linear mixed model was proposed. According to the obtained endmembers and the original image, the abundance map of the green algae terminal was calculated by the fully constrained least squares algorithm, and the abundance map of green algae was regarded as the area estimation result directly. The algorithm can effectively overcome the problem of inaccurate estimation of the estimated area of green algae due to the lack of resolution of hyperspectral image, and realize the estimation of green algae area at sub-pixel level. Based on the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) 8 bands image unfolding experiment on June 29, 2013, the estimated coverage of green algae was 321 km², which was close to that of HJ-1B satellite. Compared with NDVI and other traditional algorithms, the proposed method has obvious advantages. Traditional methods usually present higher estimation results, because they could only justify whether a

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(60975003, 61671037); 上海航天科技基金(SAST2016090)

作者简介: 潘斌(1990-), 男, 博士生, 主要从事高光谱图像分类和解混方面的研究。Email: panbin@buaa.edu.cn

导师简介: 史振威(1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事高光谱图像处理 and 机器学习相关方面的研究。Email: shizhenwei@buaa.edu.cn

pixel includes green algae or not. The proposed method may provide a new way of thinking and technology for early warning and monitoring of green algae, and has a high application value.

Key words: hyperspectral image; spectral unmixing; green algae detection

0 引言

近 10 年来,绿藻(主要是浒苔)经常在每年的 4-8 月间出现在中国的东海和黄海^[1]。绿藻群落的过生长将会严重影响沿海渔业、旅游业,破坏海洋生态系统。2008 年在青岛海域爆发的大规模浒苔聚集现象甚至影响了奥帆赛的正常进行。准确检测和估计绿藻面积具有重要意义。

传统的绿藻检测技术主要是基于指数的硬阈值分割。NDVI 算法是经典的植被检测算法,并在绿藻检测方面得到了广泛应用。参考文献[2]提出了一种基于 GOCI 卫星的绿藻检测算法(IGAG)。上述算法的最终结果都是计算出遥感图像中每个像素点对应的植被,然后通过硬阈值分割直接给出像素点标签。然而,由于星载高光谱传感器分辨率普遍较低^[3],单个像素所表示的空间范围很大,很少有某个像素完全被绿藻占据。基于指数阈值的分割算法难以计算每个像素所表示的空间中绿藻群落所占的比例。总结来说,基于指数阈值分割的算法只能检测像素块中是否存在绿藻群落,但无法准确估计群落所占的面积。

为了克服这一问题,文中提出了基于光谱解混的绿藻检测算法。光谱解混是指将像素光谱矩阵分解成两个部分:端元和相应的丰度^[4-6]。端元通常是指图像中的纯物质,而丰度则表示像素点所表示的区域中各端元所占的比例。光谱解混包括两个步骤:端元提取和丰度估计。在进行绿藻面积估计时,先通过端元提取算法获取图像中绿藻、海水等纯物质光谱,然后通过反演方法求得各组分的丰度,像素中绿藻光谱的丰度作为绿藻面积的估计值。通过这种策略可以实现亚像素级别的绿藻面积估计。N-FINDR 算法是最广泛使用的端元提取算法之一^[7]。N-FINDR 算法是基于纯像素假设,即假设图像中存在只包含单一地物的纯像素。N-FINDR 试图从图像数据中找到一组可以有效包含整个数据的单纯形顶点,且构成的单纯形体积最大。利用这种策略,可以有效地提

取图像中存在的端元。当获取绿藻光谱后,采用全约束最小二乘算法^[8]反演得到绿藻丰度,丰度值作为绿藻面积的估计值。

然而,仅仅获得不同端元的丰度并不足以实现绿藻面积估计,仍需确定哪个端元代表绿藻。为此,文中提出一种基于先验光谱的绿藻端元确定方法,将 N-FINDR 算法提取到的端元与绿藻先验光谱进行对比研究,获取真实绿藻端元,从而确定其丰度。

文中的主要贡献在于,提出一种新型的基于先验光谱解混的高光谱图像绿藻面积估计方法,能够有效克服高光谱图像分辨率低这一固有缺陷,提高面积估计精度,对于海洋灾害预报具有积极作用。文中主要以 GOCI 卫星数据作为研究对象。

1 基于光谱解混的绿藻面积估计方法

由于高光谱卫星空间分辨率普遍较低,绿藻群落往往难以覆盖整个像元所表示的范围,这使得所成图像中单个像元很可能包含多种物质,这些像元被称为混合像素。如果能计算出单个像元中绿藻群落所占的比例,就能更加准确地估计整个图像中绿藻的面积。文中采用基于线性混合模型(LSU)的思想解决这一问题。文中方法主要分为三个步骤:基于 N-FINDR 算法的端元提取、基于 FCLS 算法的丰度反演、基于丰度图的绿藻面积估计。

1.1 端元提取

1990 年, Winter 提出了著名的 N-FINDR 算法。这一算法的思想在于寻找一个体积最大的单纯形,使得这个单纯形能够包含所有高光谱图像像素,这个单纯形的顶点就是端元。单纯形体积计算方法如下:

$$\text{vol}(V) = \frac{1}{(p-1)!} \left| \det \left(\begin{bmatrix} \mathbf{1}_p^T \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \right) \right| \quad (1)$$

式中: $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_p]$ 是单纯形的顶点; p 表示端元个数; $\mathbf{1}_p$ 是一个 p 维的全 1 向量。假设坐标原点也是一个顶点,可以得到体积计算的等价形式:

$$\text{vol}(V') = \frac{1}{(p-1)!} \sqrt{\det(V'^T V')} \quad (2)$$

式中: $V'=[v_p-v_1, v_p-v_2, \dots, v_p-v_{p-1}]$ 。使得上述单纯形体积最大的顶点就是端元。**N-FINDER** 采用逐次寻找的方式获取最大体积单纯形。首先随机初始化光谱端元, 构成单纯形; 然后针对某个顶点, 用图像中所有像素点依次替换该顶点, 如果某个替换能够得到具有更大体积的单纯形, 则保留该替换。对所有顶点重复这样的过程, 直到没有任何替换能够引起凸多面体的体积增大为止。

1.2 丰度反演

获取图像中端元后, 基于线性混合模型, 使用 **FCLS** 算法得到端元丰度图。线性混合模型定义如下:

$$y=M\alpha+n \quad (3)$$

式中: $y \in R^L$ 表示图像中的一个像素; $M=[m_1, m_2, \dots, m_p]$ 表示端元矩阵, 每一列表示一条光谱, $\alpha=[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p]^T$ 是丰度矩阵; n 表示加性噪声; L 是光谱图像的波段数。为了使公式(3)具有物理意义, 需要添加丰度和为 1 约束(ASC)以及丰度非负约束(ANC):

$$ANC: \alpha_i \geq 0, i=1, 2, \dots, p \quad (4)$$

$$ASC: \sum_{i=1}^p \alpha_i = 1 \quad (5)$$

基于 **ANC** 和 **ASC**, 可以利用 **FCLS**^[8] 算法求解, 得到绿藻端元的丰度。

1.3 绿藻面积估计

为了确定所获取的端元中哪一个代表的是绿藻, 采用基于先验光谱的光谱角匹配 (**SAM**) 算法。两条光谱之间的光谱角计算公式如下:

$$\theta = \arccos \frac{\sum_{i=1}^L t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^L t_i\right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^L r_i\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

式中: t_i 表示一个端元的光谱; r_i 表示参考光谱。文中使用参考文献[9]提供的绿藻光谱曲线作为光谱先验, 计算与文中端元提取算法提取到的各端元光谱之间的光谱角, 光谱角最小的端元认为是绿藻。在匹配对象较多且光谱接近的情况下, **SAM** 算法效果并不理想。然而, 由于 **GOCI** 卫星只有 8 个波段, 文中算法所提取的端元不会超过 7 个(通常为 2~4 个)。这种情况下, **SAM** 算法可以准确的找到与先验绿藻光谱最相似的端元光谱。而且, 文中算法并不要求先验光谱十分准确, 只要保证先验光谱与实际绿藻光谱之间的光谱角要小于与海水、薄云等物质的光谱角即可。

获取绿藻端元所对应的端元后, 使用相对应的丰度图, 计算绿藻在海洋中实际覆盖的面积, 面积计算方法如下:

$$Area = Res^2 \sum_{i=1}^N A_i \quad (7)$$

式中: A_i 表示第 i 个像素中绿藻端元的丰度; Res 为图像分辨率; $Area$ 表示最终计算获得的面积值。

2 实验结果及分析

文中在 **GOCI** 数据上进行了实验, 并与经典绿藻检测算法进行了对比。文中使用了传统的 **NDVI** 算法以及近年来发展出来的 **IGAG** 算法作为对比实验。文献中, **NDVI** 和 **IGAG** 的阈值均应设为 0。在文中实验中, 目的是绿藻面积估计而不单单只是检测是否存在, 因此除了展示相关文献中所给阈值获得的面积估计结果, 还将阈值稍稍提高, 如表 1 所示。

表 1 不同方法的定量对比结果(单位: km²)

Tab.1 Quantative results by different methods (Unit: km²)

	Ground truth		Proposed method	NDVI		IGAG	
Threshold	0	0.1	-	0	0.1	0	2
Area	317	279	321	2 777	1 385	39 097	746

文中使用的 **GOCI** 数据是由国家海洋局第一海洋研究所提供, 拍摄于 2013 年 6 月 29 日, 伪彩色示意图如图 1 所示, 其中方框处为绿藻可能存在的区

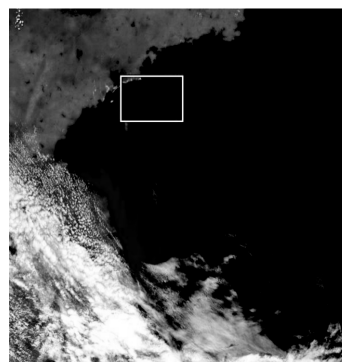


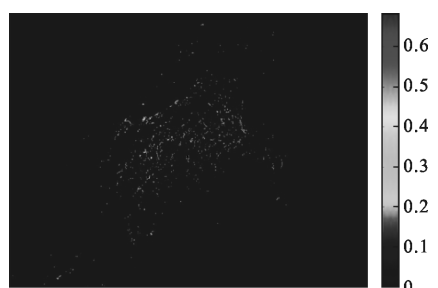
图 1 **GOCI** 卫星伪彩色图像(R-G-B=660-745-443 nm)

方框处为绿藻群落大致覆盖区域

Fig.1 False color image of **GOCI** data (R-G-B=660-745-443 nm) the green algae blooms mainly distribute in the box region

域。此外,文中使用高分辨率的 HJ-1B(30 m 分辨率)卫星同时间段拍摄到的数据作为真值,由于拍摄时间相差不到 2 h,可以近似认为两者绿藻覆盖面积是相同的。

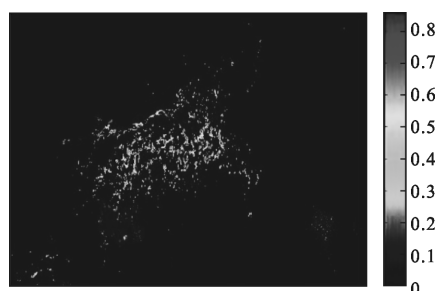
图 2 展示了不同算法获得的绿藻群落分布图。注意到结果图覆盖的范围与 HJ-1B 卫星^[10-11]相同。其中,图 2(a)表示 NDVI 算法在 HJ-1B 数据上检测到的绿藻分布图,把这个结果作为绿藻群落的真实分布。图 2(b)表示文中算法获取的绿藻端元对应的丰度图,图 2(c)、(d)分别表示 NDVI 和 IGAG 算法获取的绿藻分布图。表 1 展示了不同方法对绿藻面积的定量估计结果。从图 2 中可以看出,各个算法都能



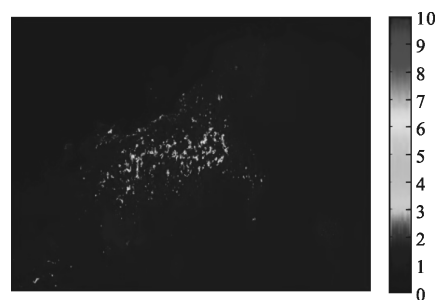
(a) 真实分布
(a) Groundtruth



(b) 文中算法结果
(b) Results of the proposed method



(c) NDVI 算法结果
(c) Results of NDVI



(d) IGAG 算法结果
(d) Results of IGAG

图 2 绿藻群落分布估计

Fig.2 Evaluation for green algae blooms distribution

大致估计出绿藻群落的分布范围。然而,与真值相比,NDVI 算法覆盖的面积明显偏大,这表明在分辨率较低的 GOCI 数据上,NDVI 算法只能检测像素内是否存在绿藻,但不能准确进行绿藻面积的估计。IGAG 算法的优点在于即使是细小绿藻信号也可以被检测到^[2],但是进行面积估计时,获得的面积比真实覆盖面积大很多,如图 2(d)所示。然而,从表 1 中可以看出,若采用文献中推荐的阈值进行绿藻面积估计,上述方法得到的结果均偏大,同时,微小的阈值变化对结果也会有明显影响。注意到当使用 NDVI 算法在 HJ-1B 数据上进行绿藻面积估计时,阈值的变化对于估计结果的影响并不明显。这主要因为 HJ-1B 卫星的空间分辨率要远高于 GOCI 卫星,在高分辨率的图像中,像素内物质混合不明显。图 2 和表 1 表明,NDVI 和 IGAG 算法用于 GOCI 卫星图像绿藻面积估计时,结果比真实值要偏大。这些传统算法对于阈值的选择都很敏感,微小的阈值变化也可能极大的影响面积估计结果。总结来说,当使用 GOCI 卫星时,传统的绿藻检测算法能够大致获取绿藻群落的覆盖范围,但难以准确计算出其覆盖的面积。这主要因为 GOCI 卫星空间分辨率较低,单个像素内绿藻难以做到完全覆盖,在像素层面上难以成功估算出面积。

文中提出的算法可以在低空间分辨率的情况下很好的估计绿藻所占面积。图 2(b)中,文中的算法可以很好的估计出绿藻的分布范围,单个像素内,绿藻所覆盖的面积被其对应的丰度很好的表示,取得了与真值基本一致的结果。表 1 中显示,文中算法取得了与真值(阈值=0)最接近的结果。与其他算法不同,文中算法不需要手动设定阈值,这使得算法的适用

范围更广、结果更加鲁棒。实验结果表明,文中提出的算法能够在亚像素级别上精确的计算绿藻的覆盖面积,即使在分辨率较低的 GOCI 卫星上也能取得更理想的结果。

3 结 论

一种新的基于光谱解混的绿藻面积估计算法被提出,实现了在亚像素水平上精确的绿藻面积估计。与传统的绿藻检测算法相比,文中算法不但能够检测到是否存在绿藻,而且能精确估计绿藻覆盖的面积。在真实 GOCI 卫星图像上的实验验证了文中算法的有效性。

参考文献:

- [1] Wu Chuanqing, Ma Wandong, Wang Xuelei, et al. Remote sensing monitoring HAB in yellow sea by HJ1-CCD [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(3): 161-165. (in Chinese)
吴传庆, 马万栋, 王雪蕾, 等. 基于环境卫星 CCD 数据的黄海浒苔遥感监测[J]. 中国环境监测, 2015, 31(3): 161-165.
- [2] Son Y B, Min J E, Ryu J H. Detecting massive green algae (ulva prolifera) blooms in the yellow sea and east China Sea using geostationary ocean color imager (GOCI) data [J]. Ocean Science Journal, 2012, 47(3): 359-375.
- [3] Wan Zhi, Ren Jianwei, Li Xiansheng, et al. The waveband selection for optical remote sensor designed for detecting marine target [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10): 1864-1869. (in Chinese)
万志, 任建伟, 李宪圣, 等. 探测海洋目标的光学遥感器工作波段选择[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1864-1869.
- [4] Wei Yiwei, Huang Shiqi, Wang Yiting, et al. Volume and sparseness constrained algorithm for hyperspectral unmixing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43 (4): 1247-1254. (in Chinese)
魏一苇, 黄世奇, 王艺婷, 等. 基于体积和稀疏约束的高光谱混合像元分解算法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1247-1254.
- [5] Tan Xiong, Yu Xuchu, Zhang Pengqiang, et al. Nonlinear mixed pixel decomposition of hyperspectral imagery based on multiple kernel SVM [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7): 1912-1920. (in Chinese)
谭熊, 余旭初, 张鹏强, 等. 基于多核支持向量机的高光谱影像非线性混合像元分解 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1912-1920.
- [6] Deng Chengzhi, Zhang Shaoquan, Wang Shengqian, et al. Hyperspectral unmixing algorithm based on L1 regularization [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (3): 1092-1097. (in Chinese)
邓承志, 张绍泉, 汪胜前, 等. L1 稀疏正则化的高光谱混合像元分解算法比较 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1092-1097.
- [7] Winter M E. N-FINDR: an algorithm for fast autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data[C]// SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 1999: 266-275.
- [8] Heinz D C. Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 529-545.
- [9] Cai Xiaoqing, Cui Tingwei, Zheng Ronger, et al. Comparison of algorithms for green macro-algae bloom detection based on GOCI [J]. Remote Sensing Information, 2014, (5): 44-50. (in Chinese)
蔡晓晴, 崔廷伟, 郑荣儿, 等. 静止海洋水色卫星 (GOCI) 绿潮探测算法对比研究[J]. 遥感信息, 2014, (5): 44-50.
- [10] Gong Dun. Research and design of mapping space remote sensor optical system[J]. Chinese Optics, 2015. (in Chinese)
巩盾. 空间遥感测绘光学系统设计与研究 [J]. 中国光学, 2015.
- [11] Zhang Junqiang, Xue Chuang, Gao Zhiliang, et al. Optical remote sensor for cloud and aerosol from space: past, present and future [J]. Chinese Optics, 2015, 8(5): 679-698. (in Chinese)
张军强, 薛闯, 高志良, 等. 云与气溶胶光学遥感仪器发展现状及趋势[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 679-698.