

基于环境卫星 CCD 数据的太湖蓝藻水华监测算法研究*

卮兆骏^{1,2}, 段洪涛^{2**}, 朱利³, 曹志刚², 陈晓宁¹, 张玉超², 马荣华²

(1: 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(3: 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要: 水体富营养化引起的蓝藻水华问题, 是我国湖泊面临的主要环境问题, 亟需加强现状监测和变化研究; 我国自主研发的环境 (HJ) 卫星空间分辨率高, 重访周期短, 可用于长时间序列蓝藻水华的动态监测. 本文利用 HJ 卫星 CCD 数据, 通过自动控制散点回归的方法进行相对辐射校正, 再将归一化植被指数和像元生长算法相结合, 提出了一种可业务化运行的蓝藻水华高精度提取算法. 该算法的优点为: (1) 水华提取时具有统一的阈值, 解决了以往一景影像一个阈值, 无法大规模批处理的难题; (2) 通过对像元进行线性分解, 精度可达到亚像元级别. 利用该算法对太湖 2009—2014 年蓝藻水华进行监测, 发现 2013—2014 年太湖蓝藻水华较以往暴发面积偏小. 研究表明, 该算法对蓝藻水华识别能力强, 自动化程度和水华提取精度高, 可作为业务化算法运行.

关键词: 环境卫星; 蓝藻水华; 自动控制散点回归; 归一化植被指数; 像元生长算法; 太湖

A novel algorithm to monitor cyanobacterial blooms in Lake Taihu from HJ-CCD imagery

NAI Zhaojun^{1,2}, DUAN Hongtao^{2**}, ZHU Li³, CAO Zhigang², CHEN Xiaoning¹, ZHANG Yuchao² & MA Ronghua²

(1: *College of Surveying and Mapping Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P.R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China*)

(3: *Environment Satellite Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, P.R. China*)

Abstract: Cyanobacterial blooms are common occurrences in eutrophic lakes, and it's urgent to monitor their area and extent effectively by remote sensing. HJ-CCD satellite data has high spatial and temporal resolution and is suitable for detecting cyanobacterial blooms of long time. In this study, relative radiometric correction of HJ-CCD images was processed using the Automatic Scattergram-Controlled Regression method to eliminate the radiometric problems. Then, a high-precision extraction algorithm of cyanobacterial blooms was put forward by combination of Normalized Difference Vegetation Index and Algae Pixel-growing Algorithm. This method provides an uniform threshold for the different HJ-CCD images and can extract blooms information of sub-pixel. Using this algorithm to monitor cyanobacterial bloom in Lake Taihu from 2009 to 2014, we found that the area of cyanobacterial blooms decreased during 2013 and 2014. The result indicated that this algorithm could identify the cyanobacteria bloom effectively and automatically with high accuracy.

Keywords: HJ-CCD satellite data; cyanobacteria bloom; Automatic Scattergram-Controlled Regression; Normalized Difference Vegetation Index; Algae Pixel-growing Algorithm; Lake Taihu

近年来, 由于太湖流域工农业的迅速发展, 大量含有丰富氮、磷等元素的污水和废水被排入太湖中, 这

* 国家高技术研究发展计划“863”项目 (2014AA06A509) 资助. 2015-06-26 收稿; 2015-09-17 收修改稿. 卮兆骏 (1990~), 男, 硕士研究生; E-mail: naizhaojun@163.com.

** 通信作者; E-mail: htduan@niglas.ac.cn.

些元素的增加使得水体富营养化,导致水中蓝藻大量生长,造成水质的恶化^[1]. 蓝藻水华大面积、长时间频发,不仅破坏了湖泊水体的正常功能和生态环境,也造成渔业产业的重大损失,严重威胁饮水安全和人类健康^[2]. 卫星遥感可以提供大范围、实时、可靠的水华信息,且便于长期监测^[3],因此已经应用到湖泊水环境的监测中. 如何利用卫星影像反演水质参数,监测蓝藻水华,获得水华的分布范围和面积已成为了国内外研究的热点.

目前最常用于水体水质监测的卫星传感器有 MODIS、MERIS 等,国内外学者提出了许多算法,如 2005 年 Gower 等针对 MERIS 数据提出了 *MCI* 指数^[4],利用 MERIS 传感器 709 nm 波段来提取蓝藻水华;2009 年 Hu 针对 MODIS 的 *Rrc* 数据提出了 *FAI* 指数来提取蓝藻水华^[5],并且于 2010 年应用在太湖的蓝藻水华监测中^[6];2014 年 Zhang 等针对 MODIS 影像提出了一种基于亚像元算法估计蓝藻水华覆盖面积的研究^[7],该方法相比于传统的线性分解算法具有更高的精度. MODIS、MERIS 数据由于具有很高的时间分辨率,广泛应用于海洋和Ⅱ类水体,但由于空间分辨率较低(MODIS 最高 250 m, MERIS FR 数据 300 m),一定程度影响着水华遥感提取的精度.

相对于 MODIS 等中等分辨率数据, Landsat 系列数据空间分辨率较高(30 m),可有效提高蓝藻水华的监测精度. 2011 年李旭文等通过比较大量 Landsat TM 影像提出了 *CBI* 蓝藻水华强度指数^[8]. 2015 年 Oyama 等基于 Landsat TM/ETM+影像,利用 *VCI* 和 *FAI* 指数结合 ETM+第 3 波段来监测蓝藻水华,并将蓝藻水华强度划分为 6 个等级^[9]. 需要注意的是, Landsat 卫星重访周期需要 16 d,加上云等天气条件的影响,使得 Landsat 影像的使用受到限制^[10],很难满足业务化高频率监测的要求.

具有高空间分辨率和高时间分辨率的多时相影像是进行动态变化监测和分析的重要数据源^[11],我国自主研发的环境卫星(HJ)具有 A、B 两颗星,组网后重访周期为 2 d,且其搭载的 CCD 传感器空间分辨率达到 30 m,因此,环境卫星可作为蓝藻水华长期监测业务化运行的观测卫星. 2011 年郭望成根据 *FAI* 指数,针对环境卫星提出了 *CAI* 指数进行太湖蓝藻水华的提取^[12],*CAI* 指数的构建需要用到 HJ-B 星的红外相机(该相机重访周期是 4 d),并且该指数的建立需要经过复杂的大气校正过程,传统的绝对辐射校正方法需要传感器定标系数、大气校正参数等,这些参数获取困难,不利于业务化的运行. 因此,在这种情况下,常采用相对辐射校正的方法,通过选取一个参考影像,将其他不同时相的影像与参考影像进行匹配校正,可以减小传感器、大气条件和太阳辐射的影响^[13]. 2012 年余晓敏进行了多时相遥感影像辐射归一化不同方法的比较研究,比较了不同相对辐射归一化方法的优缺点,并提出相对辐射归一化方法,相比于绝对辐射归一化方法更加方便实用^[14].

基于国内外研究的对比,本文最终选用 HJ 卫星作为太湖长时间序列蓝藻水华动态监测的观测卫星,并尝试(1)通过自动散点控制回归方法(ASCR)对长时间序列影像进行相对辐射校正,获取适用于不同期影像蓝藻水华提取的归一化植被指数(*NDVI*)阈值;(2)基于像元生长算法,精确统计单个像元内蓝藻水华面积与分布位置;(3)简单研究太湖 2009—2014 年长时间序列蓝藻水华时空分布,并分析变化原因.

1 数据与方法

1.1 研究区概况

太湖(30°55′40″~31°32′58″N, 119°52′32″~120°36′10″E)水域面积 2338.1 km²,是我国第三大淡水湖. 太湖地处长江三角洲腹地,横跨江、浙两省,承担着无锡、苏州、上海等地的城乡供水,服务范围超过 2000 万人^[15]. 近 20 年来,随着工农业生产的迅速发展,太湖水体富营养化严重,每年都会暴发大规模蓝藻水华. 另外,太湖东部沿岸区水体清澈^[16],生长着大量的水生植被,对于蓝藻水华的提取产生较大干扰^[17],因而在本研究中没有涉及. 另外,为了更好地对太湖不同区域蓝藻水华情况进行描述,对太湖进行了分区,具体分区边界由水利部太湖管理局提供(图 1).

1.2 数据选择与处理

环境与灾害监测预报小卫星 A/B 星(HJ-1A/1B)于 2008 年 9 月 6 日发射成功,A/B 星各搭载了两台四波段的 CCD 相机^[18]. HJ-CCD 含有 4 个波段,空间分辨率 30 m,两台 CCD 相机组网后重访周期仅为 2 d(具体参数见表 1),是比较理想的蓝藻水华监测数据. 夏、秋季是蓝藻水华暴发的高频季节,冬、春季则没有或只有零星

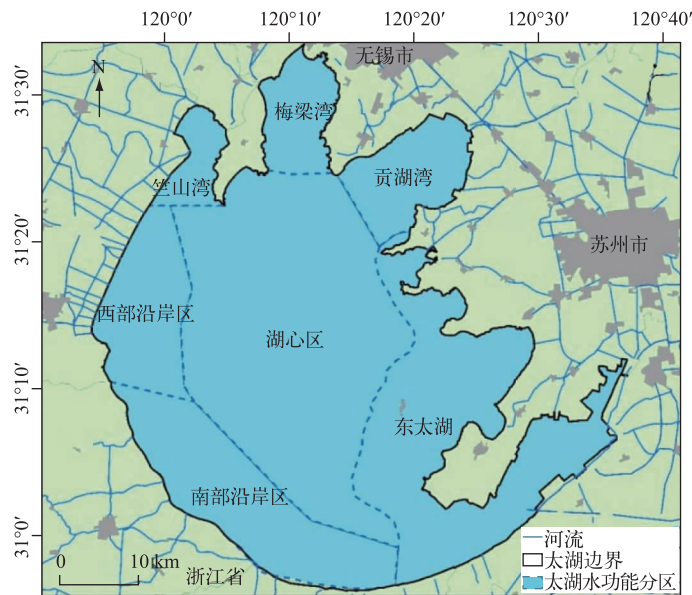


图 1 太湖地理位置及其分区

Fig.1 Location of Lake Taihu and several lake segments

水华^[19],因此本文最终选取了 2009—2014 年蓝藻水华暴发最为频繁的 7—12 月无云或少云的 55 景影像作长时间序列监测研究(表 2).

表 1 HJ 卫星 CCD 相机有效参数

Tab.1 Parameters of HJ satellite CCD camera

平台	载荷	波段	光谱范围/ μm	空间分辨率/m	幅宽/km	重访时间/d
HJ-A/B 星	CCD	1	0.43~0.52	30	360 单台 700 二台	4
		2	0.52~0.60	30		
		3	0.63~0.69	30		
		4	0.76~0.90	30		

表 2 本研究所获取的 HJ 卫星影像*

Tab.2 Acquisition data of HJ satellite images used in this study

年份	影像日期/(月/日)							
2009	08/28	09/10	10/15	10/17	10/21	11/04	11/23	12/19
	12/20	12/21	12/22					
2010	08/03	08/05	08/15	09/21	10/31	11/09	11/27	12/07
	12/08	12/20	12/22					
2011	09/24	10/09	12/12	12/24				
2012	08/18	09/19	10/01	10/18	10/23	11/06	11/07	11/19
	12/08	12/12						
2013	07/24	08/07	08/12	10/20	11/16	11/18	11/19	11/20
	11/22	11/28	12/13	12/27	12/29			
2014	07/29	08/04	10/24	12/18	12/22			

* 因云等天气条件影响有少部分月份没有可选择的影像.

根据研究需要,选择 LANDSAT-8 OLI 影像为基准影像,利用 ENVI 5.1 下 Registration(Select GCPs;Image to Image)进行几何精校正,重采样方法为双线性内插,对 HJ 卫星所有影像进行校正,校正精度均控制在 0.5~1 个像元内,使得影像各像元的位置能够匹配地面相应的地物.具体流程(图 2)为:对通过几何精校正的 HJ 卫星影像进行相对辐射校正,利用得到的校正后的影像计算 $NDVI$ 指数,并统计藻华和非藻华的 $NDVI$ 阈值,利用这两个阈值参与像元生长算法的运算,得到蓝藻水华统计面积与分布情况,当两次统计出来的面积小于限差时,即可输出该影像的蓝藻水华总面积与分布图.

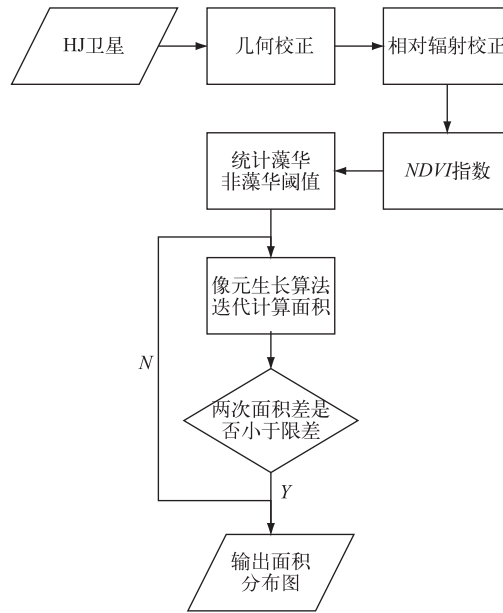


图 2 算法流程图

Fig.2 Flowchart of the algorithm progress

1.2.1 相对辐射校正 相对辐射校正可以使得相对稳定的同名地物在不同时相遥感图像上辐射值一致,这样就可以通过不同时相遥感图像上辐射值差异来实现变化监测^[20].相对辐射校正基于同一区域多时相影像相同波段的灰度值存在线性关系的假设提出来的^[21],采用多时相影像地物的灰度值代替辐射亮度或反射率进行校正,通过选定一个参考影像,将同一地区范围其他不同时相的影像校正到参考影像上.本文通过对比不同影像,最终选定 2014 年 1 月 23 日 HJ 卫星影像为参考影像,该影像天气晴朗无云,且在近红外(Band4)波段清洁水体的 DN 值为 0,具有良好的光谱动态范围,影像质量好.

传统相对辐射校正方法是采用基于全景或波谱稳定子集的统计参数方法,如最大-最小(MM)归一化法、平均标准方差法(MS)、全景简单线性回归法(SR)、直方图匹配(HM)等^[22].这些方法不能弥补各种气象条件,特别是两幅图像中有一幅出现云盖或处在不同物候期带来的不利影响.此外,在选择控制像元时需要不同程度的人工干预,人为性强^[23].

自动散点控制回归(Automatic Scattergram-Controlled Regression, ASCR)方法最初是针对 Landsat 影像提出的一种相对辐射校正方法.以待校正影像的像元值作为横轴,以基准影像的像元值作为纵轴,统计像元个数,会在图的低位和高位分别集聚成峰,靠近坐标原点 DN 值较低的像元集群是水,靠近坐标中间位置的像元集群是陆地. Landsat 有两个近红外波段,而 HJ 卫星 CCD 传感器只有一个近红外波段.从图 3 可以看出, $NDVI$ 值散点图水陆集群分界明显,因此环境卫星用 $NDVI$ 值图像来代替另一个近红外波段.通过两个像元集群的中心(在近红外波段 (i_{lmax3}, j_{lmax3}) , (i_{umax3}, j_{umax3}) 和 $NDVI$ 值波段 (i_{lmax4}, j_{lmax4}) , (i_{umax4}, j_{umax4}))分别计算两条峰值点间连线的斜率和截距.不变像元的像元集 NC 可表达为:

$$NC = (X, Y) : |y_3 - b_3 - a_3 \cdot x_3| \leq HVW_{NC3} \ \& \ |y_4 - b_4 - a_4 \cdot x_4| \leq HVW_{NC4} \quad (1)$$

$$HWP_{NC} = \sqrt{1 + a^2} \cdot HPW_{NC} / a \quad (2)$$

式中, a_3 、 a_4 是两散点图所对应的两条基线的斜率, b_3 、 b_4 是截距; x_3 、 x_4 是待校正影像的像元值; y_3 、 y_4 是参考影像的像元值; HWP_{NC} 是不变区域像元集选择的限制条件, 由 HPW_{NC} 控制, HPW_{NC} 是不变区域一侧的垂直宽度. 以此为约束条件, 寻找出所有满足条件的像元集, 使用同时满足两个波段的约束条件来确定像元集, 使得不变像元的筛选更加可靠.

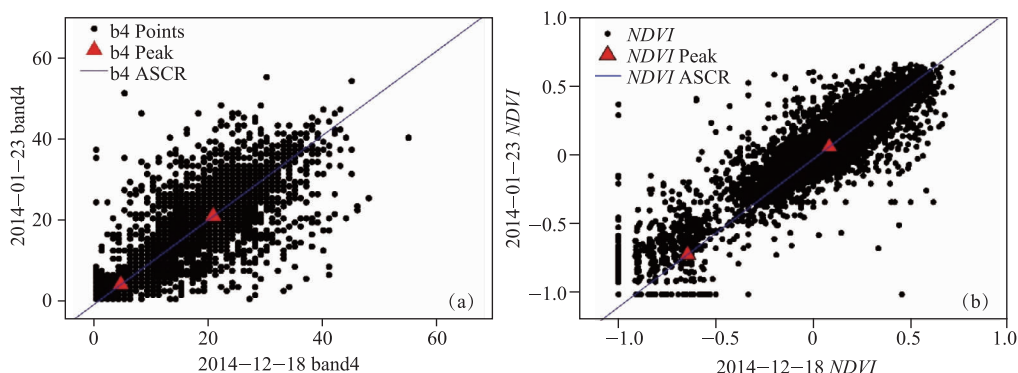


图3 环境卫星近红外波段影像(a)和NDVI值影像(b)与参考影像对应的散点图

Fig.3 Scatterplot of near-infrared(a) and NDVI (b) images with reference images

若要得到校正影像的增益系数和偏置系数, 需要计算像元集对应波段的均值和 S 值:

$$\bar{X}_k^{NC} = \frac{1}{|NC|} \sum X_k; \bar{Y}_k^{NC} = \frac{1}{|NC|} \sum Y_k \quad (3)$$

$$S_{X_{KXK}}^{NC} = \frac{1}{|NC|} \sum (X_k - \bar{X}_k^{NC})^2; S_{X_{KYK}}^{NC} = \frac{1}{|NC|} \sum (X_k - \bar{X}_k^{NC})(Y_k - \bar{Y}_k^{NC}) \quad (4)$$

式中, X_k 、 Y_k 分别是满足条件像元集的待校正影像像元值和基准影像像元值, \bar{X}_k^{NC} 、 \bar{Y}_k^{NC} 是像元集中待校正影像和基准影像的均值, $S_{X_{KXK}}^{NC}$ 是像元集中 X_k 的方差, $S_{X_{KYK}}^{NC}$ 是 X_k 、 Y_k 的协方差.

公式(2)、(3)是计算待校正影像不变区域像元集的均值和 S 值, 在得到像元集中各个波段的待校正影像的 \bar{X}_k^{NC} 值和 $S_{X_{KXK}}^{NC}$ 值以及基准影像的 \bar{Y}_k^{NC} 值和 $S_{X_{KYK}}^{NC}$ 值之后, 可用来计算待校正影像各波段的增益系数和偏置系数, 最终完成影像的校正:

$$a_k = S_{X_{KYK}}^{NC} / S_{X_{KXK}}^{NC}; b_k = \bar{Y}_k^{NC} - a_k \cdot \bar{X}_k^{NC}; \bar{X}_k = a_k \cdot X_k + b_k \quad (5)$$

式中, a_k 是增益系数, b_k 是偏置系数, X_k 是待校正影像的像元值, \bar{X}_k 是校正后影像的像元值.

1.2.2 NDVI 提取蓝藻水华 NDVI 指数对植被敏感, 蓝藻在光谱上具有明显植被的特征. 在内陆水体蓝藻水华的监测中, 使用红和近红外波段可以有效减少使用蓝绿波段时大气的影响和 CDOM 的干扰问题, 因此本文选用 NDVI 作为监测蓝藻水华暴发情况的基本指数.

对经过相对辐射校正的影像计算 NDVI 指数, 区分水华区与非水华区最关键的步骤就是确定分割的阈值. 传统的目视解译主观性强, 阈值具有不确定性. 藻华与非藻华区 NDVI 值相差明显, 分界区域坡度差异大, 因此, 利用该特点采用坡度与统计分析的方法来确定蓝藻水华阈值.

图4是2011年12月12日影像阈值的确定过程, 图4a是NDVI指数影像, 太湖范围内高亮度区域为蓝藻水华, 暗像元处为水体; 图4b是利用Arc GIS中SLOPE工具计算出来的坡度图; 图4c是坡度图中较大的坡度掩膜图, 对比图4a可以看出, 掩膜出来坡度较大的地方处于蓝藻水华与清洁水体的分界线附近; 图4d是掩膜图像与原NDVI影像的乘积. 这样, 统计出来图4d中的像元值为蓝藻水华与清洁水体分界线处的NDVI值, 对这些值进行统计分析确定该景影像的NDVI阈值.

根据上述步骤对最终提取出来蓝藻水华边界图像(图4d)的像元值做出统计直方图, 根据统计信息, 利用均值减去两倍的标准差确定该影像的蓝藻水华提取阈值为-0.054(图5).

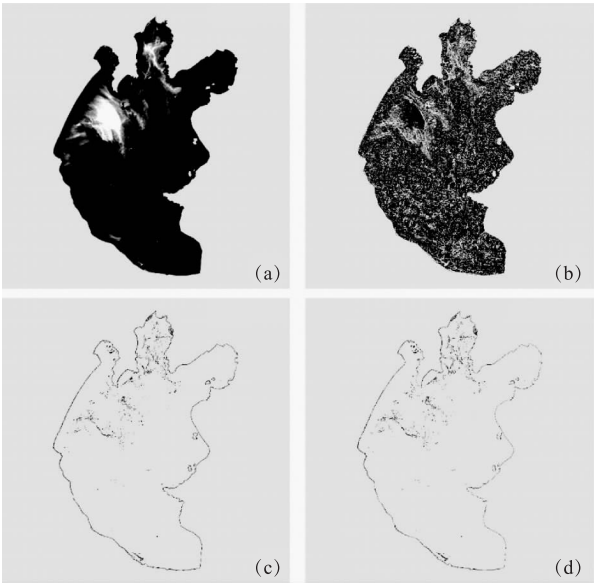


图 4 2011 年 12 月 12 日 *NDVI* 阈值提取流程:
(a) *NDVI* 指数影像; (b) 坡度图; (c) 高坡度提取图; (d) 蓝藻水华边界图
Fig.4 *NDVI* threshold extraction flow chart: (a) Image of *NDVI*; (b) Image of slope;
(c) Image of high slope; (d) Cyanobacteria bloom boundary map

依据上述坡度与统计分析的方法求出每幅影像的阈值,作出统计直方图,由于所选影像中有部分影像没有蓝藻水华,因此参与阈值计算的影像只有 45 幅,对这些阈值进行平均处理,最终得到分离蓝藻水华与清洁水体区域的阈值为-0.070(图 6),该阈值作为像元生长算法中纯蓝藻水华像元的输入阈值.

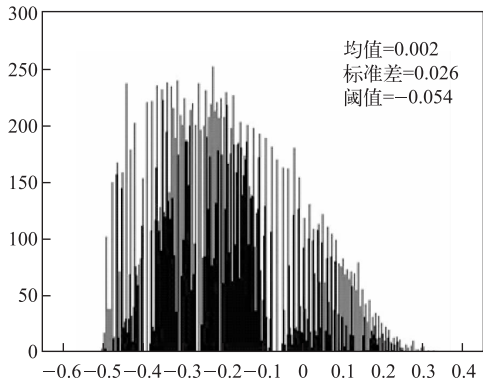


图 5 *NDVI* 蓝藻水华分界数据直方图
Fig.5 The histogram of *NDVI* cyanobacteria bloom boundary

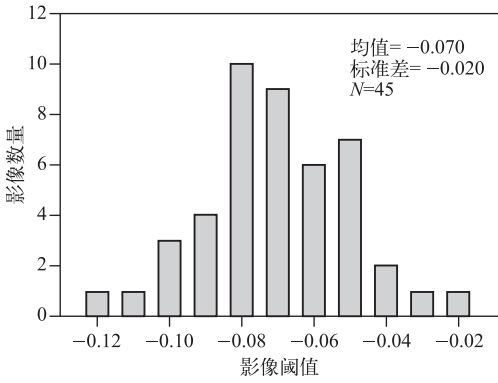


图 6 *NDVI* 阈值统计直方图
Fig.6 Threshold histogram of *NDVI*

1.2.3 像元生长算法统计面积 利用 $NDVI_{algae} = -0.07$ 提取出高浓度的蓝藻水华,但影像上也存在着许多水和蓝藻的混合像元,为了更精确地统计面积和了解蓝藻的分布,因此在 *NDVI* 阈值提取的基础上再采用像元生长算法来统计面积,可以获得单个混合像元内蓝藻水华的比例和面积. 像元生长算法的流程是先利用 3×3 窗口从输入的 *NDVI* 影像中寻找 *NDVI* 最大值和最小值并记录它们的位置,求得分解系数 γ :

$$NDVI_{center} = \gamma \cdot NDVI_{max} + (1 - \gamma) NDVI_{min} \quad (6)$$

式中, y 是 3×3 窗口中心像元 $NDVI$ 值和窗口内最大、最小 $NDVI$ 值的分解系数。

在混合像元中的蓝藻覆盖面积是由纯蓝藻面积的覆盖面积比例 a 决定的:

$$a_{\text{pixel}} = (NDVI_{\text{pixel}} - NDVI_{\text{nonalgae}}) / (NDVI_{\text{algae}} - NDVI_{\text{nonalgae}}) \quad (7)$$

式中, $NDVI_{\text{algae}}$ 为高浓度蓝藻阈值 (-0.07), 大于该阈值的像元蓝藻面积覆盖度为 1, $NDVI_{\text{nonalgae}}$ 为清洁水体不含蓝藻的阈值 (-0.44), 小于该阈值的像元蓝藻面积覆盖度为 0。

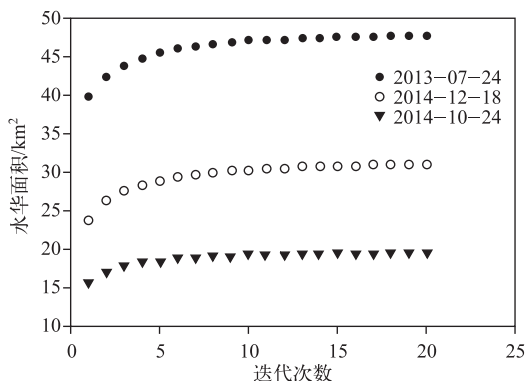


图 7 HJ 卫星蓝藻水华面积像元生长算法迭代统计

Fig.7 Changes in the HJ satellite-derived algae coverage area

与中心像元 $NDVI$ 阈值一样, 每个中心像元蓝藻的覆盖面积也是由 3×3 窗口邻域中最大和最小覆盖面积像元决定的, 因此中心像元的覆盖面积定义为:

$$a_{\text{center}} = y \cdot a_{\text{max}} + (1 - y) a_{\text{min}} \quad (8)$$

其中, a_{max} 和 a_{min} 分别是 3×3 窗口像元中最大和最小面积覆盖度值。

利用 3×3 窗口遍历每个像元, 根据公式 7 求得中心像元的盖度比例, 并累计求得总面积。最终判断相邻两次求得的面积差是否满足约束条件, 不满足则继续迭代循环直到总面积趋于稳定。随机挑选了 3 个日期的蓝藻水华迭代面积做迭代统计 (图 7), 可以看出影像迭代 3~4 次之后, 相邻两次面积的差小于 1 km^2 , 蓝藻水华总面积趋于稳定。

2 结果与分析

2.1 相对辐射校正结果验证

选取了 2012 年校正后的 3 幅影像用于相对辐射校正结果的验证。通过随机抽选 3 幅影像上相同位置处的灰度值, 进行线性回归比较发现, 任意 2 幅影像的回归方程斜率均在 1 左右, 且 R^2 在 0.9 以上 (图 8), 该结果说明校正结果较为理想。因此, 自动散点控制回归方法可以用于对影像做相对辐射校正。

自散点控制回归方法相比于其他的线性相对辐射校正方法具有诸多优点: 对于云/阴影/雪的影响具有一定的削弱作用; 使用了影像当中大部分的像素; 归一化误差分布给不同的陆地覆盖类型避免了一些特定训练区样本选取的误差的积累; 消除了亮暗像元选择的必要性; 相比较其它的经验方法减少了人为的干预, 节约了时间和人力^[24]。但相对辐射校正不能消除云和大气的干扰, 几何配准的精度一定程度上也会影响相对辐射校正的结果。

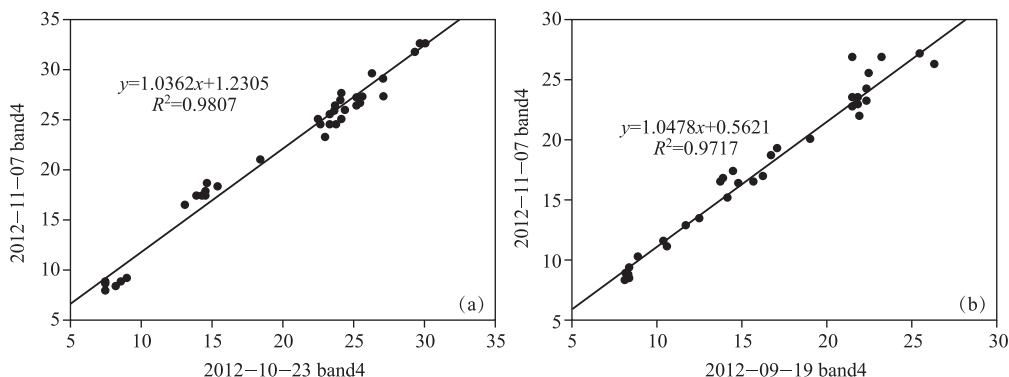


图 8 自动散点控制回归方法验证

Fig.8 Validations of Automatic Scattergram-Controlled Regression

2.2 太湖蓝藻水华提取结果评价

为了对本算法提取结果进行验证,通过对比环境卫星影像、*NDVI* 值图像和像元生长算法统计图像(图 9),可以看出图 9b 和图 9e 的 *NDVI* 图像中蓝藻水华与清洁水体的分界过于粗糙,面积偏小,而图 9c 和图 9f 像元生长算法影像提取出来的蓝藻水华与清洁水体的分界纹理清晰,空间分布与原图像一致、更加合理. 并且像元生长算法统计出的影像可以清楚地获得每个像元蓝藻水华的覆盖程度,便于更加直观地了解每个区域蓝藻水华的暴发程度.

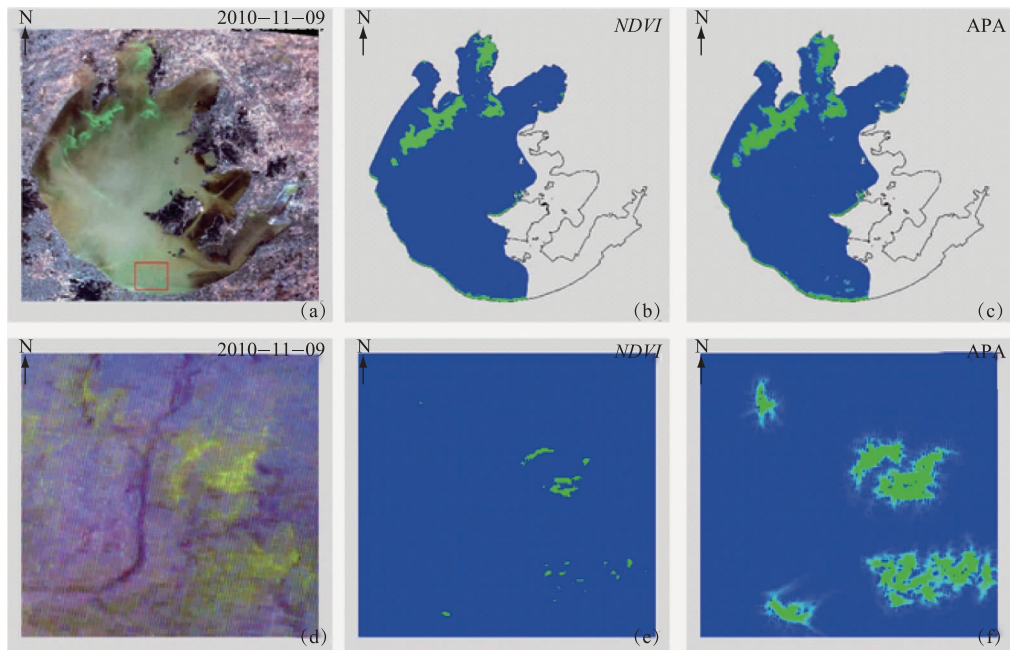


图 9 环境卫星原图像、*NDVI* 值图像和像元生长算法提取图像的对比
(图 d、e、f 是图 a 中红色方框放大显示的区域)

Fig.9 Comparisons between images, *NDVI* and APA values from HJ-CCD data

此外,通过对比图 10a、b、c 中红色方框处可以发现,原影像有云的区域,*NDVI* 值会上升,对蓝藻水华的提取产生干扰,而通过 APA 算法提取的影像有效抑制了云的干扰;通过图 10d、e、f 中红色方框处的对比可以发现,原影像因成像时产生的条带干扰也会导致 *NDVI* 值出现异常,而 APA 算法提取的蓝藻水华影像也会对此产生抑制作用. 因此,通过像元生长算法提取蓝藻水华具有更加直观、准确和稳定的效果.

2.3 太湖蓝藻水华时空变化

对 2009—2014 年下半年所选的所有影像进行蓝藻水华的提取和面积的统计可以看出,2010—2012 年太湖水体状态较为恶劣. 从影像日期可以看出太湖每年最大面积蓝藻水华暴发时间发生在秋季. 从蓝藻水华分布的空间可以看出西太湖、竺山湾和梅梁湾水华严重,暴发频率较大,严重时发展到湖心区,南部沿岸和贡湖湾水体状况最好,很少出现水华(图 11).

取每月最大蓝藻水华暴发面积作为当月的蓝藻水华暴发面积,对 2009—2014 年间所选所有影像进行蓝藻水华暴发面积信息的统计(图 12a),可以看出夏季尤其是 7 月份,符合要求的影像很少,这主要是多云雨天气造成的,但从仅有的影像可以看出 2013 和 2014 年 7 月份太湖蓝藻水华暴发面积较小,水体状况较好. 秋季是太湖蓝藻水华最为严重的季节,面积上来看秋季蓝藻水华面积最大,其中水华暴发最为严重的就是 8、9 月,这是因为在营养盐充足的条件下,温度和光照是影响蓝藻水华的主要因子. 在夏季,温度超过 35℃ 以后,蓝藻会因为怕热,更倾向于在水面下;秋季,由于温度适宜,反而造成蓝藻颗粒漂浮于水面,水华大规模暴发. 冬季较秋季蓝藻水华面积略有下降,但仍存在,这是因为近年来湖泊水环境的恶化导致蓝藻水华持

续时间增长.

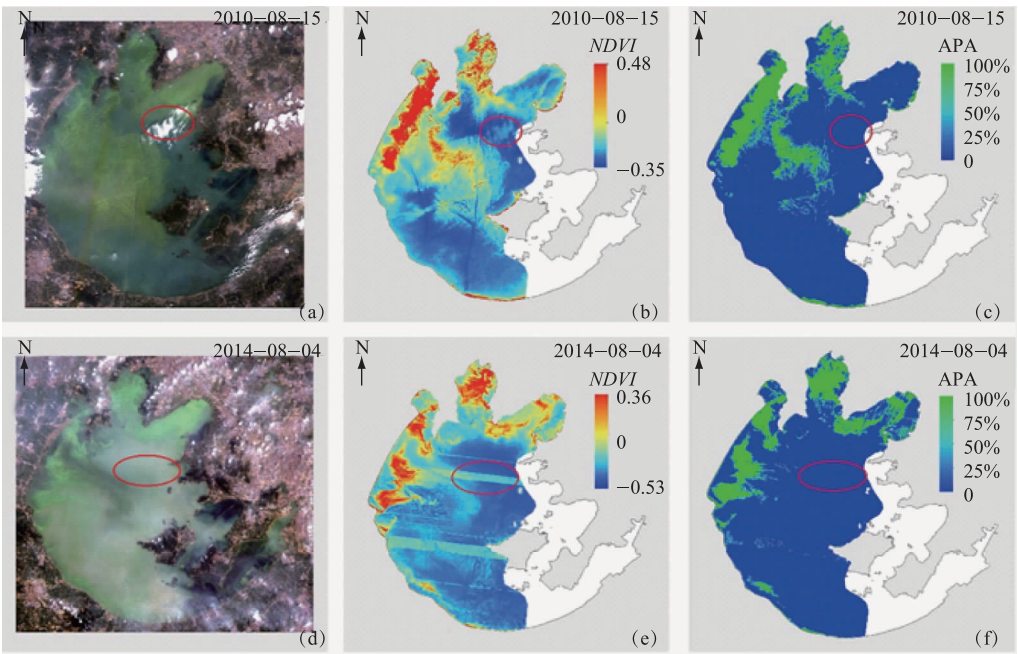


图 10 像元生长算法图像适用性评价

Fig.10 Applicability evaluation of APA values from HJ-CCD data

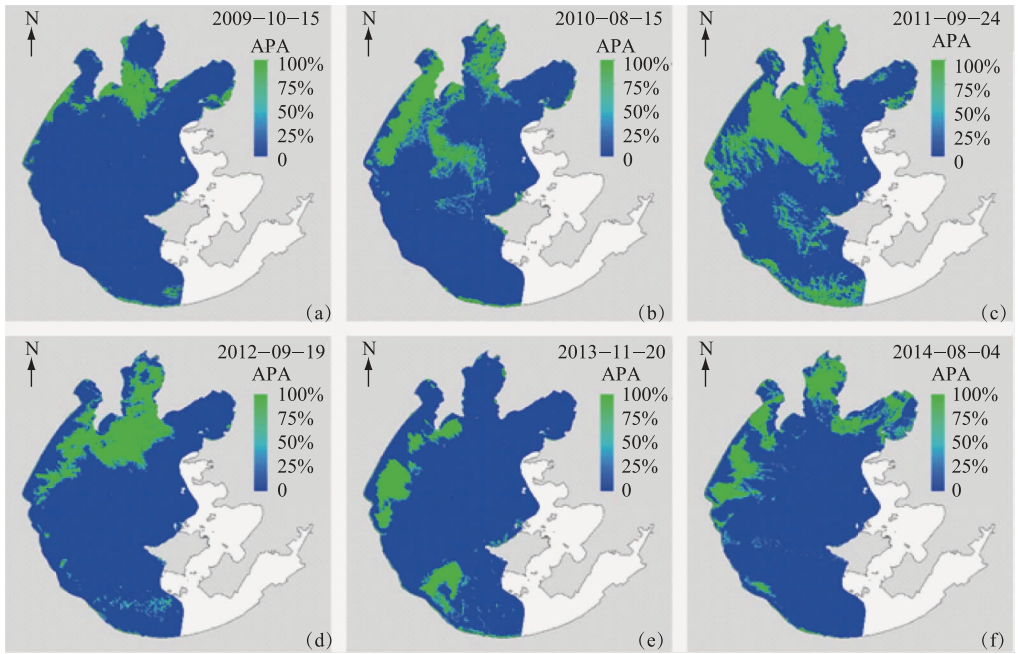


图 11 2009—2014 年蓝藻水华最大暴发面积比较

Fig.11 The comparison of max cyanobacteria bloom area from 2009 to 2014

从 2010 年开始太湖水质呈下降趋势,蓝藻水华暴发加剧,面积增大,但从 2013 年开始水质出现改善,2013 和 2014 年太湖蓝藻水华暴发面积小,水体状况好(图 12b)。

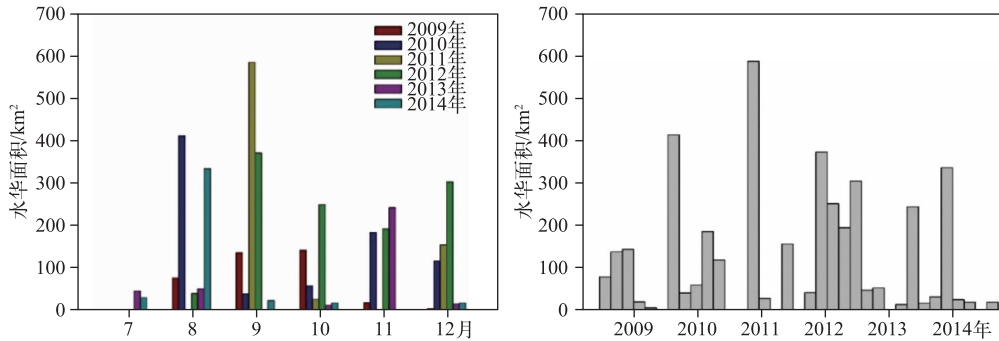


图 12 月际间(a)和年际间(b)蓝藻水华面积比较

Fig.12 The comparison of cyanobacteria bloom area in different months(a) and years(b)

3 结论

本文通过自动散点控制回归的方法对 2009—2014 年下半年影像进行相对辐射校正,利用 *NDVI* 阈值提取高浓度蓝藻水华,再结合像元生长算法进一步获取蓝藻水华的面积和空间分布情况,该方法较精确地获取了太湖蓝藻水华暴发面积和分布状况. 仅利用 HJ 卫星 CCD 传感器所拍摄的影像,无需经过复杂的大气校正,也不用获得传感器的定标系数和大气校正参数,为该方法的业务化运作提高了可行性;并且从结果来看该方法对云、影像条带等具有一定的抗干扰能力,提取的蓝藻水华在空间上分布合理、可靠. 从该方法提取的蓝藻水华结果来看,2009 年太湖水体环境较好,2010—2012 年太湖蓝藻水华暴发面积增大,但从 2013 年之后水体环境得到了改善. 今后,可以依据本研究的思路对提取指数的选择和相对辐射校正的方法进行改进,以便应对更复杂的大气状况,更精确地获取蓝藻水华的面积和空间分布情况.

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所“湖泊-流域科学数据共享平台”提供数据.

4 参考文献

- [1] 刘文杰. 内陆湖泊蓝藻水华的遥感监测与评价研究[学位论文]. 北京:中国地质大学, 2013.
- [2] 肖永辉. 巢湖富营养化连续在线监测与蓝藻水华预警[学位论文]. 扬州:扬州大学, 2011.
- [3] 孔维娟, 马荣华, 段洪涛等. 太湖秋冬季蓝藻水华 MODIS 卫星遥感监测. 遥感信息, 2009, **104**: 80-85.
- [4] Gower J, King S, Borstad G *et al.* Detection of intense plankton blooms using the 709 nm band of the MERIS imaging spectrometer. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**(9): 2005-2012.
- [5] Hu CM. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**: 2118-2129.
- [6] Hu CM, Lee ZP, Ma RH *et al.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Taihu Lake, China. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: 4002-4020.
- [7] Zhang YC, Ma RH, Duan HT *et al.* A novel algorithm to estimate algal bloom coverage to subpixel resolution in Lake Taihu. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, **7**(7): 3060-3068.
- [8] 李旭文, 牛志春, 姜 晟等. 基于卫星影像的太湖蓝藻水华遥感强度指数和等级划分算法设计. 环境监测管理与技术, 2011, **5**: 23-31.
- [9] Oyama Y, Fukushima T, Matsushita B *et al.* Monitoring levels of cyanobacterial bloom using the visual cyanobacteria index (VCI) and floating algae index (FAI). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, **38**: 335-348.
- [10] Roy DP, Ju J, Lewis P *et al.* Multi-temporal MODIS-Landsat data fusion for relative radiometric normalization, gap filling,

- and prediction of Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 3112-3130.
- [11] Hajj ME, Bégué A, Lafrance B *et al.* Relative radiometric normalization and atmospheric correction of a SPOT 5 time series. *Sensors*, 2008, **8**: 2774-2791.
- [12] 郭望成. 基于环境 1 号卫星的蓝藻水华提取方法研究[学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [13] 张友水, 冯学智, 周成虎. 多时相 TM 影像相对辐射校正研究. *测绘学报*, 2006, (2): 122-128.
- [14] 余晓敏, 邹 勤. 多时相遥感影像辐射归一化方法综述. *测绘与空间地理信息*, 2012, (6): 8-13.
- [15] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 230.
- [16] Ma RH, Tang JW, Dai JF. Bio-optical model with optical parameter suitable for Taihu Lake in water color remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4305-4328.
- [17] 马荣华, 段洪涛, 张寿选等. 太湖草型湖区底质对遥感反射比的贡献. *遥感学报*, 2008, **13**(3): 483-489.
- [18] Li JS, Shen Q, Zhang B *et al.* Retrieving total suspended matter in Lake Taihu from HJ-CCD near-infrared band data. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2014, **17**(3): 280-289.
- [19] 徐 昕. 基于 MODIS 的富营养化湖泊蓝藻水华时空分布及气象影响分析[学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- [20] 邓书斌, 武红敢, 江 涛. 遥感动态监测中的相对辐射校正方法研究. *遥感应用*, 2008, **98**: 71-76.
- [21] 余晓敏, 陈云浩. 基于改进的自动散点控制回归算法的遥感影像相对辐射归一化. *光学技术*, 2007, **2**: 185-189.
- [22] Yuan D, Elvidge C. Comparison of relative radiometric normalization techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1996, **51**: 117-126.
- [23] 陈崇成, 黄方红, 黄 绚. 自动散点控制回归技术在遥感数据辐射归一化中的应用. *地球信息科学*, 2000, **2**: 52-56.
- [24] Elvidge CD, Yuan D, Weerackoon RD *et al.* Relative radiometric normalization of landsat multispectral scanner (MSS) data using an automatic scattergram-controlled regression. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, **61**: 1255-1260.