

# 基于云覆盖分类的太湖蓝藻 MODIS 图像分析

李士进<sup>1</sup>, 刘 帅<sup>1</sup>, 杨 晨<sup>1</sup>, 高祥涛<sup>2</sup>

(1. 河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 210098)

(2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

**[摘要]** 太湖蓝藻已经成为一个社会和政府共同关注的环境问题, 如何及时、准确地获取蓝藻发生、发展状况信息, 是目前水环境监测的难点. 本文以 MODIS 遥感图像为监测信息源, 提出一种新的彩色图像分析方法快速提取太湖蓝藻信息. 首先使用模板匹配算法快速提取 MODIS 遥感图像的太湖水域信息, 并针对遥感图像获取过程中的云层覆盖干扰, 提出将图像分为无云覆盖和有薄云覆盖两类分别处理的方法, 提高了不同天气情况下蓝藻信息提取的有效性. 最后通过对一年内多幅太湖 MODIS 遥感图像的蓝藻信息提取, 定性分析了太湖蓝藻的时空分布特点, 为研究太湖蓝藻发生、发展规律提供技术支撑.

**[关键词]** MODIS 蓝藻提取, 太湖, 云覆盖分类, HSI 彩色模型

**[中图分类号]** TP391 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2012) 03-0031-07

## Cyanobacteria Information Extraction in Taihu Lake Based on Cloud Analysis With MODIS Imageries

Li Shijin<sup>1</sup>, Liu Shuai<sup>1</sup>, Yang Chen<sup>1</sup>, Gao Xiangtao<sup>2</sup>

(1. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China)

(2. Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Cyanobacteria bloom-forming in Taihu Lake has already become an environmental problem which is concerned with the whole society and the government. It is difficult for the department of water-environment monitoring to monitor the bloom on the lake timely and accurately. By using template matching process, the territorial waters information of Taihu Lake is extracted firstly. To tackle the problem of Cyanobacteria under clouds cover, the problem is divided into two, one is under the clouds cover, the other is under no clouds. Experimental results on hundreds of MODIS images show that the proposed method is effective with satisfactory accuracy. Furthermore, spatio-temporal analysis of Cyanobacteria during the year 2006 reveals the underlying knowledge of its year pattern, which can provide decision support information for the administrative departments.

**Key words:** MODIS, cyanobacteria extraction, Taihu Lake, cloud cover classification, HSI color model

太湖流域是我国人口最集中、经济最发达、产业最密集、城镇化程度最高的地区之一, 流域面积仅占国土面积的 0.4%, 但国民生产总值超过了全国的 10%, 在国民经济和社会发展中起着举足轻重的作用<sup>[1]</sup>. 近年来随着经济的高速发展, 环境保护明显落后于经济发展的步伐, 过度的资源利用及污染导致太湖的水质日益恶化, 尤其是蓝藻大规模爆发. 因而建立合适的太湖蓝藻监测机制, 及时获取蓝藻的产生、分布、强度等信息至关重要<sup>[2]</sup>.

利用遥感图像监测广阔水域的水环境, 是一个由来已久的课题<sup>[3]</sup>. 目前国内外学者利用遥感技术对蓝藻的研究取得了一定的进展. 谢国清等<sup>[4]</sup>通过研究滇池蓝藻在可见光、红外谱段的光谱特征, 并利用假彩色合成法以及归一化植被指数进行了滇池蓝藻信息的遥感识别和提取. Anu Reinart 等<sup>[5]</sup>结合生物-光学模型, 比较了 SeaWiFS、MODIS/Aqua 和 MERIS 影像数据在识别波罗的海部分水域蓝藻中的效果, 结果表明, 在蓝藻爆发早期, 各种影像数据给出的识别结果较为一致, 特别到了蓝藻爆发的严重期, 高光谱影像

收稿日期: 2012-07-40.

基金项目: 国家自然科学基金(61170200).

通讯联系人: 李士进, 博士, 教授, 研究方向: 图像分析, 模式识别. E-mail: lishijin@hhu.edu.cn

MERIS 和 MODIS 表现出较好的蓝藻识别能力. Richard H Becker 等<sup>[6]</sup>基于 MODIS 影像数据提取了 10 景北美洲五大湖部分研究区 2004 年和 2005 年夏季蓝藻空间分布图,与实地测定数据检核,得出这种方法提取的结果准确有效,并能有效控制成本.由于遥感传感器多在电磁波谱的可见光波段工作,云层对地面的覆盖构成了遥感应应用中最大的干扰因素,造成了遥感图像在地学应用难以克服的障碍.因此需要进行适当的去云预处理,以尽量减小云层覆盖对使用遥感图像的影响<sup>[7]</sup>.常见的遥感图像去云处理方法有基于小波分解的方法<sup>[8]</sup>、多源图像融合法<sup>[9]</sup>和同态滤波法(homomorphic filtering)<sup>[10]</sup>.朱锡芳等<sup>[8]</sup>将图像进行适当层次的小波变换,通过增大细节系数来突出背景信息,减小近似系数来去除云雾信息.多源图像融合法是将目标区域无云层覆盖的多源遥感图像信息融合到待处理图像信息中,得到目标区的无云图像.同态滤波方法将带云遥感图像先取对数运算后,使图像转换到频域,利用巴特沃斯高通滤波器进行滤波,以达到抑制低频、增强高频信息的目的,最后将滤波后结果经过指数运算得到去云后图像.这些方法的优点是具有较强的处理能力,甚至可以去除遥感图像中的少量厚云;缺点是算法复杂度较高,不适合紧急情况下的快速分析处理.

本文提出对云层覆盖下的蓝藻信息进行提取,而并不依靠前期对遥感图像进行复杂的去云处理.提取过程中考虑到原始波段遥感图像具有很高的相关性,在干扰比较大的图像中会影响蓝藻提取的有效性,因此本文提出将更符合人对彩色描述的 HSI 颜色模型引入到蓝藻信息的提取过程中.通过颜色空间变换,研究云、水体、蓝藻与 HSI 3 个分量(色调、饱和度、强度)之间的关系,并据此将图像进行蓝藻分类处理.最后对太湖 2006 年的多幅 MODIS 遥感图像进行蓝藻信息提取,并进行时空分析,对蓝藻的规模、范围以及蔓延趋势进行了归纳总结,从而为太湖蓝藻水华预警提供辅助决策支持.

## 1 基于 HSI 颜色模型及 NDVI 植被指数的太湖蓝藻信息提取

由于蓝藻信息的提取是基于太湖水域范围,本文首先采用模板匹配方法准确提取出太湖水域信息.经典的模板匹配方法称之为归一化互相关匹配算法(Normalized Correlation),该算法是利用计算模板图像与被搜索图像互相关值来确定匹配程度.互相关值最大的位置决定了模板图像在被搜索图像中的位置.

计算模板  $T$  和被搜索图  $S$  的互相关值  $D_{i,j}$  及其归一化值  $R_{i,j}$  的公式如下:

$$D_{i,j} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |S_{i+m,j+n} - T_{m,n}|, \quad (1)$$

$$R_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_{i+m,j+n} \times T_{m,n}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S_{i+m,j+n}]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T_{m,n}]^2}}, \quad (2)$$

式中  $M, N$  是图像的宽度和高度,  $m, n$  是图像像素坐标,  $i, j$  是模板搜索位置.当模板图像和被搜索图完全一样时  $R_{i,j} = 1$ .模板图像在被搜索图中完成全部搜索后,找到  $R$  的最大值  $R_{\max}(i_{\max}, j_{\max})$ ,对应子图  $(i_{\max}, j_{\max})$  即为匹配目标.而本文中模板匹配的模板和被搜索图都是二值图像,因此在进行模板匹配计算时,采用式(1)中的绝对差值法.由于将式(2)右边分子中的乘法变成了式(1)中的减法,因此速度更快.

获得太湖水域信息后,本文首先根据云覆盖的情况将太湖遥感图像分成 3 类:无云覆盖、薄云覆盖和厚云覆盖.由于厚云覆盖下的蓝藻信息人眼完全不可辨,因此对厚云覆盖的区域仅做图像判别处理,而不进行蓝藻信息的进一步提取.然后将蓝藻信息的提取分成两种情况,即无云覆盖下的蓝藻信息提取和薄云覆盖下的蓝藻信息提取.针对无云层覆盖下的蓝藻信息提取,本文采用 NDVI 植被指数的方法,进行阈值分割.而薄云覆盖下的蓝藻信息在提取之前,先利用图像处理的手段对图像进行预处理,进行颜色空间转换,将相关性很大的颜色空间换到 HSI 颜色空间,提取出较为有效的特征,从而将薄云覆盖的遥感图像进一步细分.最后根据每一类子图像直方图利用模式识别方法将蓝藻信息视作前景,云层视作背景,利用前景类和背景类的类间方差自动确定一个合理的阈值区分这两类图像,从而有效提取蓝藻.

### 1.1 基于 HSI 颜色模型的图像粗分类

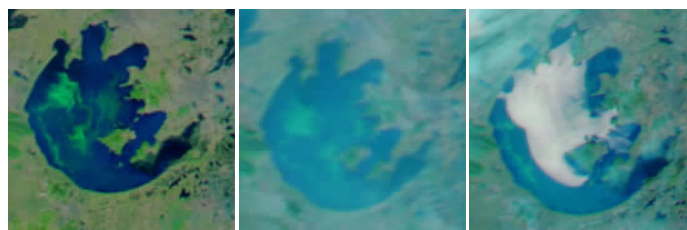
原始 MODIS 遥感图像具有 36 个通道,各通道图像间的相关性很大,如何区分图像是否被云层覆盖很难直接通过常规 RGB 三通道来实现,而水利部门在监测蓝藻时,利用的是水利遥感中心统一分发的三通

道彩色图像, 因此本文将之转换到 HSI 颜色空间进行分析. 利用 HSI 颜色空间处理图像, 有两个主要的特点: 首先强度分量  $I$  被单独提取出来, 不再和彩色信息相关, 因色度和耀斑、阴影无关, 所以在一些亮度变化的场合特别有用, 而本文中薄云图像的显著特点就是高亮度和低饱和度, 因此可以将强度分量  $I$  作为识别云的特征; 其次色调分量  $H$  及饱和度分量  $S$  与人感受彩色的方式紧密相连, 对于区分通用颜色的物体具有很强的实用性<sup>[11]</sup>.

本文对多幅无云状况下的蓝藻图像进行了直方图分析, 发现无云情况下水域信息在 HSI 空间中的  $I$  分量 ( $0 \leq I \leq 1$ ) 集中在小于 0.2 的区间. 利用该阈值对多幅图像进行有云和无云的图像分割, 结果比较令人满意, 但是分割过程中由于高浓度蓝藻区域的图像在 HSI 颜色空间中的高强度会误将这部分区域划分到薄云覆盖的部分之内. 因此针对此情况在识别过程中需要增加一个特征: 将三通道 RGB 彩色图像中的  $G$  分量作为一个特征加入分割判断. 由于较高浓度蓝藻在合成图像中呈现绿色调, 因此, 当  $I > 0.2$ ,  $G > R$  并且  $G > B$  时则判断为蓝藻, 而不是薄云覆盖情形.

由于厚云覆盖时图像呈现低饱和度和高强度(亮度), 该区域的水体或蓝藻信息几乎不可见, 因此本文设置判断条件如下: 当强度分量  $I > 0.6$ , 且饱和度  $S < 0.2$  时为厚云覆盖.

经过上述分析处理, 一幅 MODIS 遥感图像就根据云覆盖的情况分成了 3 类: 无云覆盖、薄云覆盖和厚云覆盖. 图 1 给出了上述 3 种典型情况的太湖 MODIS 图像.



无云覆盖

薄云覆盖

厚云覆盖

图 1 3 种不同类型图像

Fig.1 Three typical kinds of images

下一节主要对无云和薄云覆盖下的蓝藻进行提取, 而厚云覆盖下水体和蓝藻信息均不可见, 因此不再进一步分析.

## 1.2 基于 NDVI 植被指数的蓝藻信息提取

### 1.2.1 无云情况下蓝藻信息提取

无云状况下的蓝藻信息提取, 目前运用得较多也较为成熟的方法是利用归一化植被指数 NDVI 对蓝藻信息进行提取. 对分类后图像中无云覆盖的部分计算其 NDVI 值, 并将其值的大小归一化到  $[0, 255]$ . 由于近红外波段水体强烈吸收, 而蓝藻与植被同样出现“陡坡效应”, 因此, 低蓝藻浓度的 NDVI 值随浓度升高而迅速增加. 将蓝藻视为前景, 水面视为背景, 前景和背景之间的对比度较高, 体现在直方图上, 蓝藻和水面(水体)形成双峰, 并选择合适的阈值进行划分. 经过多次实验本文选择阈值 95(对应于归一化之前的 NDVI 值为 0.0063), 这一实验结果也与前人利用 NDVI 对蓝藻信息进行提取所得出的参数阈值(NDVI 值的过零点即为判断蓝藻的阈值)相符合. 图 2 给出了一幅太湖 MODIS 遥感图像的 NDVI 值的灰度图及其对应的灰度直方图.

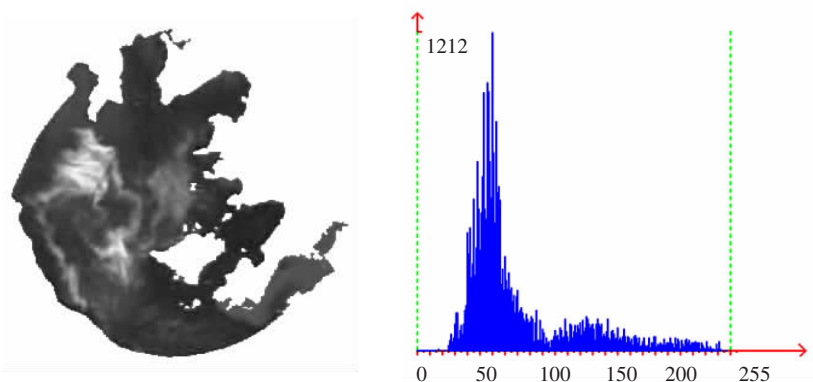


图 2 一幅太湖 MODIS 遥感图像的 NDVI 值的灰度图及其对应的灰度直方图

Fig.2 The grey level NDVI image of an MODIS image over Taihu Lake, and the corresponding histogram

### 1.2.2 薄云情况下蓝藻信息提取

由于云层的存在, 图像的饱和度降低而强度升高, 云层覆盖下的图像对比度降低. 可以通过减少云层

的干扰而提取云层覆盖下的遥感信息,如文献[12]中作者利用云像素所具有的高亮度的特征,将阈值设为图像的亮度均值和方差的和,找到所有亮度值大于阈值的像素作为云像素种子,成为下一步区域生长的开始点.对种子的邻域进行递归搜索,将满足阈值条件的像素点加入种子,最终获得目标图像.但是这种方法抗干扰性较差.文献[13]中利用多通道的遥感图像中云的纹理和统计特征建立云特征模型,对遥感图像进行低通滤波和锐化之后,进行纹理和统计特征的提取,最后运用聚类算法检测云层.该方法建立模型时需要的信息量大,处理云覆盖地表信息具有局限性,而且处理薄云覆盖的能力比较弱.本文提出一种在已知信息量较少的情况下,对云层覆盖下的蓝藻信息快速提取的方法.

本文使用的是一种基于OTSU算法的改进算法.将太湖水域的遥感图像的NDVI值看成前景和背景两部分,由于蓝藻的存在,即使是云层覆盖下的蓝藻信息在遥感图像上也会体现出与周围不同的NDVI值,因此,将蓝藻的NDVI灰度图视为前景,无蓝藻的部分视为背景.本文算法将前景类和背景类的类内中心作为考量,结合OTSU和最大熵阈值法的思想来选择最佳阈值实现对图像快速而准确地分割.

最大类间方差法(OTSU)<sup>[14]</sup>是一种图像分割中常用的方法,它的基本思想是以最佳阈值将图像的直方图分割成两部分,使两部分类间方差取最大值,即分离性最大.在分割之前取最大和最小灰度值的平均值作为初始的分割前景和背景的阈值.

对于一幅复杂的同时包含蓝藻和云层覆盖的MODIS遥感图像,它的NDVI值灰度直方图如图3所示.

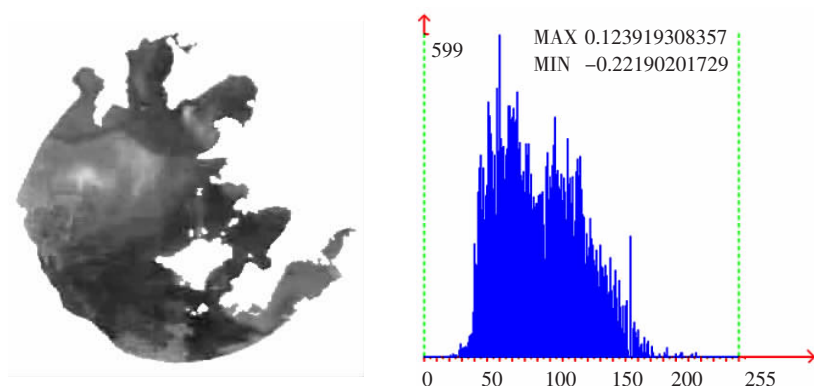


图3 薄云覆盖下一幅MODIS遥感图像NDVI值灰度图及直方图

Fig.3 The grey level NDVI image of an MODIS image over Taihu Lake with thin-cloud cover, and the corresponding histogram

从图3中可以看出,由于不同厚度云层的作用,使得蓝藻和云层的NDVI值相互混淆,蓝藻区域的灰度直方图单峰性并不明显.这样求取前景类和背景类的最大方差阈值分割点进行图像分割的时候,会造成大量的非蓝藻区域被误划分.因此,为了使得蓝藻和云层两类图像的直方图峰更加明显,本文将云层按照厚度进行再分类,分类后的每一类图像再进行自适应阈值分割,提取蓝藻区域(像素).

利用上一节的实验结果,由于云层的厚度和像素点的强度分量存在一定的线性关系<sup>[15]</sup>,所以本文将薄云覆盖的情况按照云层的厚度再次细分,分别取无云状况以及厚云状况下的强度分量 $I$ 的差值的等分点作为阈值,将图像按照云厚度进行分类.本文对多幅图像分类实验发现,分类过多会造成类类之间的间隔过小,每一类图像所包含的像素点较少,从而导致进行阈值分割的时候,阈值的确定缺乏一定的普适性,容易造成阈值附近的像素点被误划分.因此最终本文对薄云覆盖的图像细分成3类.图4给出了图3中薄云部分分成3类图像对应的直方图.

可以发现,在不包含蓝藻区域的图像(图4中第一、第二幅直方图),由于按照云层厚度进行了划分,减小了背景类(云层)的类内方差,使得背景类图像的灰度图呈现出更好的单峰性.而包含蓝藻区域的图像(如图中红圈所示区域),由于背景类(云层)的方差减小,而前景类(蓝藻)所在区域并未因为划分云层厚度阈值的变化发生改变,这样使得前景类和背景类呈现出更好的双峰性质.利用两类的类间方差最大准则求取的阈值将能更加准确地区分出两类图像.图5给出了本文方法提取各种情况下蓝藻信息的部分处理结果.



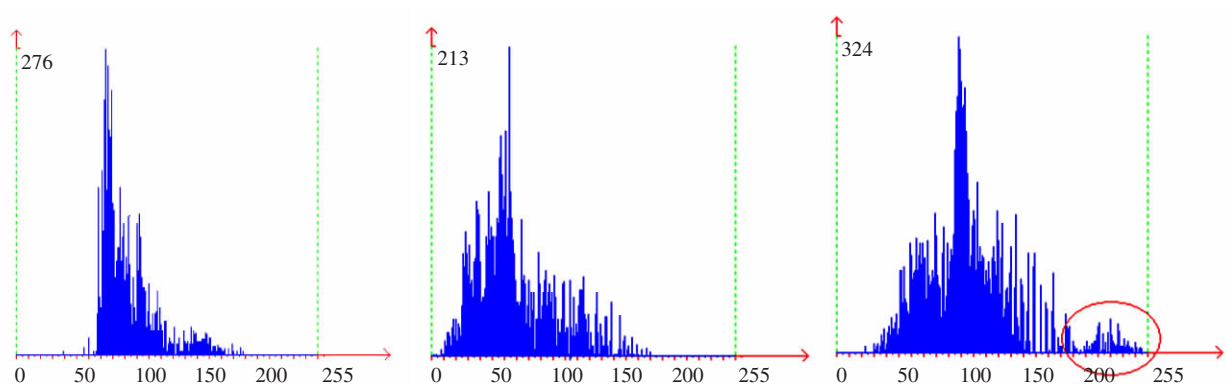


图4 薄云部分分成3类图像对应的NDVI值灰度直方图(圆圈标注的区域是前景类(蓝藻)NDVI所在的大致范围)

Fig.4 The thin-cloud cover is divided into three subimages and their NDVI histogram, the circle indicates the NDVI of cyanobacteria

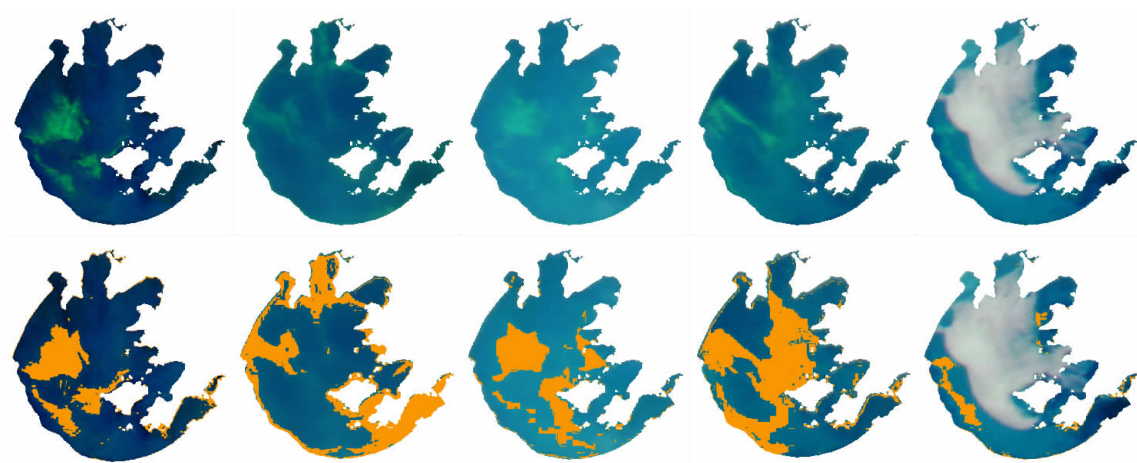


图5 云层覆盖下的蓝藻信息提取效果图

Fig.5 The information extraction of Cyanobacteria under different kinds of cloud cover situations

## 2 蓝藻信息时空分析

对单幅图像进行处理,获取的是单个时间点的蓝藻信息,如果对一个时间序列的遥感图像进行分析,就能通过提取目标信息的变化得到若干规律性的结论.本文选取了2006年中多幅图像进行了蓝藻信息的提取,并选取了每月有代表性的遥感图像,如图6所示.对多时相蓝藻监测数据的统计分析中,文献[16]建立了基于多源卫星遥感图像的太湖蓝藻信息提取的普适模式,获取了天气晴好条件下蓝藻的面积和空间分布,分析了近年来太湖蓝藻爆发时间及发生区域.从图6可以看出本文方法不只限于处理天气晴好条件下的太湖MODIS遥感图像.

由图6可知:

(1) 冬季并不是完全没有蓝藻分布,但是相对于全年的水平,冬季蓝藻总量较少.

(2) 春季蓝藻规模一开始并没有太大的变化,但是湖岸沿线出现了目视可见的蓝藻分布.4月份蓝藻的生长加速,大面积的蓝藻首先出现在湖岸和零星湖湾中,而且北部湖湾地区的蓝藻有向太湖中心地区蔓延的趋势.

(3) 进入夏初时节,蓝藻的规模进一步扩大,迎来了其生长的第一个高峰.北部湖湾都出现了蓝藻的分布,而且以竺山湾的蓝藻最为繁盛,几乎覆盖了整个湖湾.沿岸的蓝藻规模继续扩大,在西南部的湖岸蓝藻向湖心区蔓延.盛夏时节,蓝藻的规模在经历了全年第一个生长高峰之后进入了一个相对平缓的时间段,主要集中在北部的部分湖湾和沿岸,包括湖心岛屿的沿岸也有零星的蓝藻分布.时间进入8月,蓝藻迅速进入了第二个生长高峰,这段时间内蓝藻的规模和覆盖范围都是一年中最大的.

(4) 初秋的蓝藻规模延续了夏末的趋势,中心地区的规模进一步扩大,从北到南蔓延至整个太湖中心地区.而北部湖湾内的蓝藻规模有所下降,湖湾的中心区域的蓝藻逐渐退去,仅在沿岸周围仍有大量蓝藻

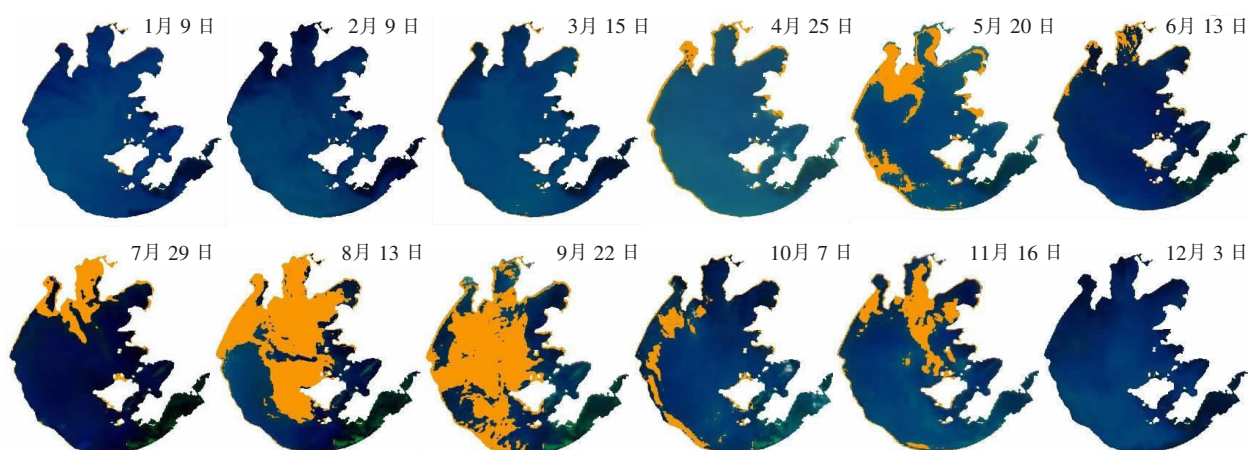


图6 2006年内多幅代表性遥感图像蓝藻信息提取序列图(其中东太湖沼泽化区域由于一年时相中的遥感图像会有较大不同,因此在做时间序列分析的时候,暂不考虑这一区域)

Fig.6 The time series of Cyanobacteria information extraction from MODIS images in 2006(the east region of Taihu lake is omitted due to the obvious difference of the area in different time of the year)

分布.随着冬季的来临,大面积的蓝藻逐渐消失,只在太湖沿岸的部分地区还有零星分布.

从太湖各个区域观察蓝藻发生、发展的趋势也可以看出,蓝藻首先出现在西部湖岸和竺山湾,在3月份这两片区域蓝藻的规模不断扩大逐渐连成一片,向梅梁湾和湖心区的方向蔓延.而蓝藻消失的过程是从湖心区的蓝藻面积减少开始,随后贡山湾和梅梁湾内蓝藻逐渐消失,最后竺山湾和西部湖岸的蓝藻规模降低到一个较低水平,并在冬季维持这一水平.

### 3 结论

目前对NDVI值提取蓝藻信息的研究较为广泛且深入,但太湖复杂的水环境会造成归一化植被指数描述蓝藻信息的不准确性.因此,对于太湖整个水域范围利用单一NDVI值标准进行蓝藻信息提取并不可靠,以后的研究将往针对不同水环境建立独立蓝藻信息提取模型的方向发展.

而本文的研究过程中,也出现了由于云层较厚造成蓝藻信息提取不够准确的情况.在后续的研究中,将进一步对这些误分割的情况进行分析,挖掘提取更加有效的特征.由于数据源有限,为了达到实际应用要求的提取精度,还需要结合更多的实测数据对本文方法进行验证和完善.

### [参考文献](References)

- [1] 黄贤金,王腊春,高超,等.太湖水资源水环境研究[M].北京:科学出版社,2008.  
Huang Xianjin, Wang Lachun, Gao Chao, et al. Study on Water Resources and Water Environmental Issues of Taihu Lake [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 孙刚,盛连喜.湖泊富营养化治理的生态工程[J].应用生态学报,2001,12(4): 590-592.  
Sun Gang, Sheng Lianxi. Ecological engineering for eutrophication control in lake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 590-592. (in Chinese)
- [3] 李纪人,黄诗峰.“3S”技术水利应用指南[M].北京:中国水利水电出版社,2002  
Li Jiren, Huang Shifeng. 3S Technology and Their Applications in Water Resources [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2002. (in Chinese)
- [4] 谢国清,李蒙,鲁伟坤,等.滇池蓝藻水华光谱特征、遥感识别及暴发气象条件[J].湖泊科学,2010,22(3): 327.  
Xie Guoqing, Li Meng, Lu Weikun, et al. Spectral features, remote sensing identification and breaking-out meteorological conditions of algal bloom in Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(3): 327. (in Chinese)
- [5] Reinart A, Tiit Kutser. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(1-2): 74-85.
- [6] Becker Richard H, Sultan Mohamed I, Boyer Gregory L, et al. Mapping cyanobacterial blooms in the Great Lakes using MODIS

- [J]. Journal of Great Lakes Research ,2009 ,35( 3) : 447-453.
- [7] 张鹏强 ,余旭初 ,韩丽. 遥感图像薄云滤波增强[J]. 海洋测绘 ,2008 ,28( 2) : 13-16.  
Zhang Pengqiang ,Yu Xuchu ,Han Li. Enhancement of remote sensing images with thin clouds[J]. Hydrographic Surveying and Charting ,2008 ,28( 2) : 13-16. ( in Chinese)
- [8] 朱锡芳 ,吴峰 ,庄燕滨. 基于 Mallat 算法遥感图像去云雾处理的改进方法[J]. 遥感学报 ,2007 ,11( 2) : 241-246.  
Zhu Xifang ,Wu feng ,Zhuang Yanbin. An improved approach to remove cloud and mist from remote sensing digital images based on Mallat algorithm[J]. Journal of Remote Sensing ,2007 ,11( 2) : 241-246. ( in Chinese)
- [9] 李新宇 ,刘扬扬 ,蒋雪娜 等. 基于高维空间几何信息学的遥感图像去薄云算法[J]. 电子学报 ,2011 ,39( 05) : 1 002-1 006.  
Li Xinyu ,Liu Yangyang ,Jiang Xuena ,et al. An novel algorithm to remove the thin cloud from remote sensing images based on high-dimensional space geometrical informatics[J]. ACTA Electronica Sinica ,2011 ,38( 5) : 1 002-1 006. ( in Chinese)
- [10] 谢华美 ,何启翔 ,郑宁 等. 基于 ERDAS 二次开发的遥感图像同态滤波薄云去除算法的改进[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版 ,2005 ,41( 2) : 150-153.  
Xie Huamei ,He Qiao Zheng Ning ,et al. The improved homomorphic filter algorithm for removing cloud of remote sensing image based on the second exploitation of ERDAS tool[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition ,2005 ,41( 2) : 150-153. ( in Chinese)
- [11] 杨旭强 ,冯勇 ,刘洪臣. 一种基于 HSI 颜色模型的目标提取方法[J]. 光学技术 ,2006 ,32( 2) : 290-292.  
Yang Xuqiang ,Feng Yong ,Liu Hongchen. An object extraction method based on HSI color model[J]. Optical Technique ,2006 ,32( 2) : 290-292. ( in Chinese)
- [12] 黄勇杰 ,王树国 ,刘俊义 等. 遥感图像去云算法研究[J]. 仪器仪表学报 ,2003 ,24( 4) : 491-492.  
Huang Yongjie ,Wang Shuguo ,Liu Junyi ,et al. Research on removing cloud to the remote sensing images[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument ,2003 ,24( 4) : 491-492. ( in Chinese)
- [13] 郁文霞 ,曹晓光 ,徐琳 等. 遥感图像云自动检测[J]. 仪器仪表学报 ,2006 ,27( 6) : 2 184-2 186.  
Yu Wenxia ,Cao Xiaoguang ,Xu Lin ,et al. Automatic cloud detection for remote sensing image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument ,2006 ,27( 6) : 2 184-2 186. ( in Chinese)
- [14] 周新丰. 基于图像处理的空中目标识别技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学计算机科学与技术学院 ,2003.  
Zhou Xinfeng. The research of air target recognition based on image processing[D]. Nanjing: College of Computer Science and Technology ,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics ,2003. ( in Chinese)
- [15] 祝令亚. 湖泊水质遥感监测与评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所 ,2006.  
Zhu Lingya. Remote sensing monitoring and evaluation method of the lake water quality[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences ,2006. ( in Chinese)
- [16] 马荣华 ,孔繁翔 ,段洪涛 等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识[J]. 湖泊科学 ,2008 ,20( 6) : 687-694.  
Ma Ronghua ,Kong Fanxiang ,Duan Hongtao ,et al. Spatio-temporal distribution of cyanobacteria blooms based on satellite images in Lake Taihu ,China[J]. Journal of Lake Sciences ,2008 ,20( 6) : 687-694. ( in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]