

滇池蓝藻水华光谱特征、遥感识别及暴发气象条件^{*}

谢国清¹, 李蒙¹, 鲁韦坤¹, 周伟民¹, 余凌翔¹, 李发荣², 杨树平²

(1: 云南省农业气象与卫星遥感应用中心, 昆明 650034)

(2: 昆明市环境监测中心, 昆明 650034)

摘要: 通过研究滇池蓝藻水华在可见光、红外波段的光谱特征, 并利用假彩色合成法以及归一化植被指数(*NDVI*)法进行了滇池蓝藻水华信息的遥感识别和提取, 进而对提取结果进行了对比分析。结果表明: 假彩色合成图的绿色区域和*NDVI*值大于-0.1的区域, 为蓝藻水华区域。-0.1≤*NDVI*≤0.2时, 轻度水华, 像元内水华覆盖度为0~30%; 0.2<*NDVI*≤0.4时, 中度水华, 像元内蓝藻水华覆盖度为31%~80%; *NDVI*>0.4时, 重度水华, 水华浓厚, 像元内蓝藻水华覆盖度为81%~100%。同时研究了激励滇池蓝藻水华暴发的关键气象因子和指标。滇池蓝藻水华暴发的关键时期是6~9月份, 影响滇池蓝藻暴发的关键因子是日照和风速。6~9月份连续4~5h的光照, 且风速≤2m/s的气象条件组合极易引起蓝藻水华暴发。

关键词: MODIS; 蓝藻水华; 遥感识别; 气象条件; 滇池

Spectral features, remote sensing identification and breaking-out meteorological conditions of algal bloom in Lake Dianchi

XIE Guoqing¹, LI Meng¹, LU Weikun¹, ZHOU Weimin¹, YU Linxiang¹, LI Farong² & YANG Shuping²

(1: Yunnan Agrometeorological and Satellite Remote Sensing Application Center, Kunming 650034, P. R. China)

(2: Kunming Environment Monitor Center, Kunming 650034, P. R. China)

Abstract: Based on high spectral reflectivity features of Blue-green Algal Bloom (BAB) in Lake Dianchi, by MODIS satellite remote sensing data, RGB:621 combined false color synthesis and Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) method, we found that green region in false color synthesis image and the region with *NDVI* value > -0.1 were just the BAB area. When -0.1≤*NDVI*≤0.2, slight BAB occurred, and bloom coverage in a pixel reaches 0~30%; when 0.2<*NDVI*≤0.4, moderate bloom happened, bloom coverage in a pixel reached 31%~80%; dense bloom came forth while *NDVI*>0.4, and bloom coverage in a pixel can be 81%~100%. From June to September is the key period for BAB breaking-out in Lake Dianchi, and the key factors to affect BAB breaking-out maybe sunshine and wind velocity. During this period, if the sunshine can last for only 4~5 hours and the wind velocity ≤2m/s, it's quite easy for BAB breaking-out.

Keywords: MODIS; blue-green algal bloom; remote sensing recognition; meteorological condition; Lake Dianchi

自20世纪80年代以来, 滇池的富营养化状况日趋严重, 导致湖内蓝藻大量繁殖^[1], 被国务院列为重点治理的湖泊。近年来, 滇池水体每年都会发生不同范围、不同程度的蓝藻水华现象。这种现象不仅恶化了水体的感官性状, 而且破坏了滇池生态系统平衡, 严重降低了滇池的使用功能。在蓝藻水华暴发期间, 有关部门要根据水华的分布和发生程度, 采用人工打捞等方式集中去除蓝藻水华。因此, 如何宏观动态地监测滇池蓝藻水华分布状况, 如何及时预警蓝藻水华的暴发已成为目前迫切需要解决的问题。

以往研究表明: 包含蓝藻水华水体的反射光谱在蓝波段和红波段的吸收峰较为明显, 而在近红外波段具有类似于植被光谱曲线特征的“陡坡效应”, 即在可见光波段反射率低, 在近红外波段反射率却明显升

* 中国气象局蓝藻水体监测预警系统(一期)项目和昆明市环境保护局项目联合资助. 2009-04-08 收稿; 2009-10-27收修改稿. 谢国清,男,1963年生,高级工程师;E-mail:yyy666333@163.com.

高^[2~4]. 据此, 遥感技术提供了快速大范围监测蓝藻水华的可能.

遥感以其宏观、快速、成本低和便于进行长期动态监测的优势, 在区域面状水质监测中发挥了重要作用. 针对蓝藻的遥感监测研究, 美国、西班牙、荷兰、澳大利亚等国都对其进行了专门立项^[5]. 国内外诸多专家学者也都纷纷致力于该项研究. Prangsma 等^[6]利用 AVHRR 波段 2 相对较高反射率信息, 成功地进行了近海清水区藻华水体的遥感识别及其时间序列分析. Lefelier 等^[7]利用 MODIS 较高的辐射分辨率(12bit, TM 图像 8bit)来估算叶绿素浓度, 研究结果表明, 在最适宜的观测条件下, 利用 MODIS 的特定波段可以很灵敏地监测到叶绿素 a 在海洋表面 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 的浓度变化. Stumpf 等^[8]和 Lenvine 等^[9]利用 Landsat TM 数据对 Champlain 湖和 Vermont 湖的蓝藻进行了监测, 以细胞流速仪的检测结果作参照, 取得了较好的效果. Tii Kutser 等^[10]采用生物光学模式对波罗的海水体中的蓝藻进行了监测. 国内学者胡德永^[11]应用陆地卫星 TM 观测到渤海赤潮蓝藻水华. 李旭文等^[12]以 TM 影像为数据源, 利用叶绿素 a 与差值植被指数 DVI(TM4-TM3) 之间很高的相关性, 对太湖梅梁湾叶绿素 a 及蓝藻生物量进行了遥感估算. 黄家柱和赵锐等^[13]利用 TM 数据监测 1998 年 8 月 11 日太湖蓝藻暴发情况; 胡雯等^[14]建立了基于 FY1C/CAVHRR 数据的巢湖蓝藻叶绿素 a 含量遥感估算模型, 开展了 NOAA 卫星监测巢湖蓝藻水华的试验. 王海君等^[15]基于 ASTER 数据, 结合实地采样数据对太湖梅梁湾的蓝藻分布状况进行了分析研究. 马荣华等^[16]利用实测光谱和水质采样数据, 通过多种方法对太湖叶绿素和悬浮物等水质指标进行估测. 闻建光等^[17]基于传统的经验模型, 提出基于混合光谱模型的估测叶绿素浓度的新方法, 并和其它模型作了比较分析; 段洪涛等^[18]基于不同遥感数据, 包括 MODIS/Terra、CBERS. 2 CCD、ETM 和 IRS. F6 LISS3, 结合蓝藻水华光谱特征, 采用单波段、波段差值、波段比值等方法, 提取不同历史时期太湖蓝藻水华. 周立国等^[19]基于 MODIS 卫星影像, 采用比值模型方法、进一步确定蓝藻分布的相对浓度信息. 徐京萍等^[20]利用 MODIS 数据成功提取蓝藻水华信息, 用近红外光波段比值识别模式和植被指数 NDVI 值、EVI 值识别模式确定蓝藻分布范围. 陈云、王得玉和梅长青等^[21~23]对太湖和巢湖蓝藻水华遥感监测也做了研究.

在针对蓝藻生长与环境条件关系的研究方面, 金相灿等^[24]研究了温度对水华微囊藻及孟氏浮游蓝丝藻生长、光合作用及浮力变化的影响. 张晓峰等认为^[25]: 藻类的总生物量也与水温关系密切, 其总量受水温变化的影响最大. 任健等^[26]研究了太湖蓝藻暴发的气象条件. 我们在实地做了大量的调查和观察, 发现在阴天和雨天, 水华面积较小; 晴天时水华面积较大. 为此, 本文假设气象条件是导致蓝藻暴发的关键因素.

本文通过对滇池不同覆盖程度的蓝藻水华进行高光谱遥感观测试验, 研究不同覆盖程度的蓝藻水华的反射率特征. 针对 2008 年 5~10 月的滇池蓝藻暴发期, 应用 MODIS 卫星遥感资料, 研究滇池蓝藻水华信息识别技术、蓝藻水华不同覆盖程度的遥感参数指标, 并对导致滇池蓝藻水华暴发的气象因子和指标进行了细致分析, 旨在为突发水华事件中快速获取蓝藻分布信息, 为建立实时监测和预警系统奠定基础.

1 资料与方法

1.1 实验设计

1.1.1 试验区概况 滇池($102^{\circ}36'~102^{\circ}47'E, 24^{\circ}40'~25^{\circ}02'N$)是高原湖泊, 位于云南省昆明市南端, 分内海和外海两部分, 北部为内海, 南部为外海. 水面海拔高度为 1887.4m 时, 流域面积 2920km^2 , 湖面面积为 309km^2 , 最大水深 11.2m, 平均水深 5.3m, 容水量为 $15.6 \times 10^8 \text{m}^3$, 南北长 39km, 东西最宽为 13km.

1.1.2 光谱测量仪器和方法 光谱测量采用合肥仪思特光电技术有限公司生产的 ISI921VF-52 地物光谱仪, 波长范围 380~1080nm, 光谱分辨率为 2nm, 视场角 3°. 测量时间为晴空 09~14 时. 按照唐军武等提出的水面以上水体光谱测量法的要求, 进行光谱测定^[27]. 测量点用 GPS 定位. 用数码相机对测量目标拍照并做文字说明. 测量滇池蓝藻水华光谱的日期为 2007 年 10 月 8 日、2008 年 4 月 1 日、4 月 11 日、4 月 18 日、5 月 7 日、7 月 30 日.

1.1.3 光谱资料预处理 用仪器生产公司与仪器配套提供的数据处理软件, 对实测光谱数据与对应的标准白板数据进行处理, 得到光谱反射率数据. 然后对同一测量点同一时次测量的光谱反射率数据进行算术平均.

1.2 遥感资料与气象资料处理

1.2.1 蓝藻卫星遥感监测机理 蓝藻暴发时引起水体温度、色度和透明度等一系列物理性质发生变化,进而导致水体反射波谱特性也发生变化。其高叶绿素a含量,使得水体反射光谱在蓝波段和红波段的吸收峰较为明显^[2],而在近红外波段具有类似于植被光谱曲线特征的“陡坡效应”,即在可见光波段反射率低,在近红外波段反射率却明显升高。卫星探测器可以准确无误的将这种兼有水体和植被的光谱特性记录下来。蓝藻的以上光谱特性使得其大面积的卫星遥感信息提取成为可能。

1.2.2 MODIS 数据来源 利用的影像数据是2008年5月7日、5月27日、6月28日、7月7日、7月23日、7月30日、8月20日和8月22日的本站MODIS(Terra)卫星接收站接收的晴空条件下的实时资料。

1.2.3 MODIS 数据预处理 用星地通公司开发的MODIS后端处理程序,在EOSshop商业软件平台上,完成研究区域影像分辨率为250m和500m的初步地理校正和投影,并将光谱值转化为反射率值。再利用ENVI 4.3提供的大气校正模块进行大气校正。

1.2.4 监测结果真实性检验 采用汽艇,在不同覆盖程度的水华区的分界点、中心点,进行GPS定位,用数码相机对目标拍照并做文字说明。同时取水回实验室测量蓝藻生物量。通过对比分析星地观测结果,确定用假彩色合成法和归一化植被指数(*NDVI*)法识别滇池蓝藻水华信息的技术标准,和判定滇池蓝藻水华不同覆盖程度的遥感参数指标。

1.2.5 滇池蓝藻水华暴发的气象条件分析 所使用的气象资料是昆明气象站2008年4月1日至10月31日的逐日逐时资料,包括平均气温、降水量、风速及日照时数等要素。气象站位于滇池东北部的岸边,是国家基准气象站。水温资料来自昆明市环境监测中心的水质监测站。数据分析采用多元统计分析方法及MATLAB 7.0软件进行Pearson相关性分析。

2 结果分析

2.1 滇池蓝藻水华光谱特征

研究滇池蓝藻水华光谱特征,能够为卫星遥感蓝藻提供依据。蓝藻水华的光谱特征与植被的光谱特征相似,不同覆盖程度的蓝藻水华的光谱曲线特征有明显差异(图1)。在380~700nm波段范围,当蓝藻水华覆盖程度变化时,相同波段的反射率变化不明显,且都在435nm、620nm和675nm处存在吸收峰,在550nm处存在反射峰。

在700~940nm波段范围内,反射率随蓝藻水华覆盖程度增加而增大。当蓝藻水华稀薄且水面未被蓝藻完全覆盖时(图1中⑥~⑩),反射率较低,与550nm的反射峰相当。当水面蓝藻生物量密度增加到一定程度时(图1中③~⑤),曲线形态表现为肩状,反射率高于550nm反射峰。蓝藻水华覆盖程度进一步增大后(图1中①~②),反射率明显增大,且分别在770nm、840nm和895nm处有三个相对平缓的反射峰。

在近红外波段具有类似于植被光谱曲线特征的“陡坡效应”,710nm附近存在反射峰,该反射峰值随蓝藻水华覆盖程度增加而增大,峰值位置向长波方向移动。在940~1080nm波段范围内,反射率随蓝藻水华覆盖程度增加而增大,波动也逐渐增大。

2.2 假彩色合成法识别滇池蓝藻水华信息

根据实测光谱分析,叶绿素在红波段的620nm和675nm附近有显著的吸收(对应MODIS-1通道,620~670nm)。在MODIS-2通道(841~876nm)的光谱范围内,反射率随蓝藻水华覆盖程度增加而增大。据以往研究,水体对近红外波段吸收比较强,当水中含叶绿素时,反射率随蓝藻水华覆盖程度增加而增大,本研究也表明:实测光谱波长大于950nm时,对于同一浓度的叶绿素反射率随着波长的增加而增加(图1)。为了更好地利用近红外波段的蓝藻水体光谱特性,本研究通过反复实验,用MODIS第6通道(1628~1652nm)的数据参与假彩色合成具有较好的视觉效果。因此本文选择MODIS 6、2、1通道进行假彩色合成。实验选取2008年5月7日、5月27日、6月28日、7月7日、7月23日、7月30日、8月20日和8月22日的MODIS卫星遥感资料,是本站MODIS卫星接收站接收的晴空条件下的实时资料。数据处理后采用500m空间分辨率的红外波段6,以及250m分辨率重采样为500m分辨率的近红外波段2,红光波段1进行假彩色合成(图2a,如以7月7日为例)。图中黑色为水体,绿色为蓝藻水华,随着蓝藻水华覆盖度的增加,假彩色合成法的颜色也从暗绿渐变到亮绿。从图像上可基本识别蓝藻水华的分布情况。

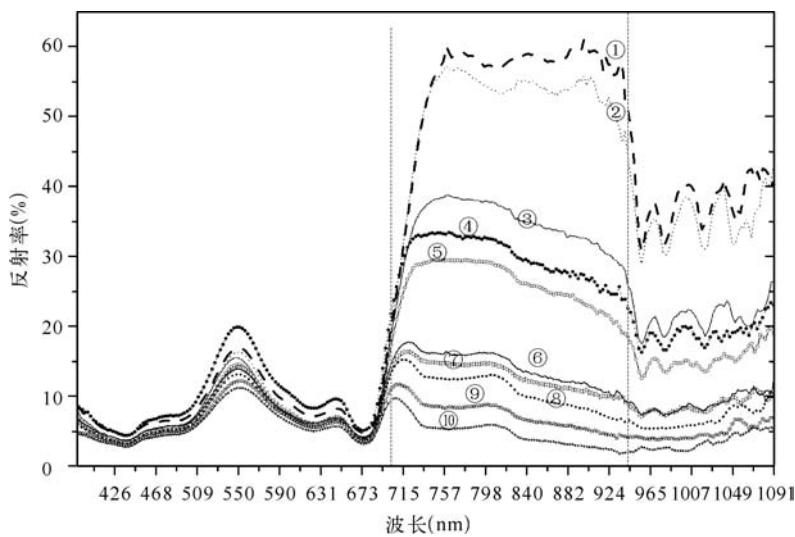


图 1 滇池蓝藻水华光谱

Fig. 1 Spectrum of algal bloom in Lake Dianchi

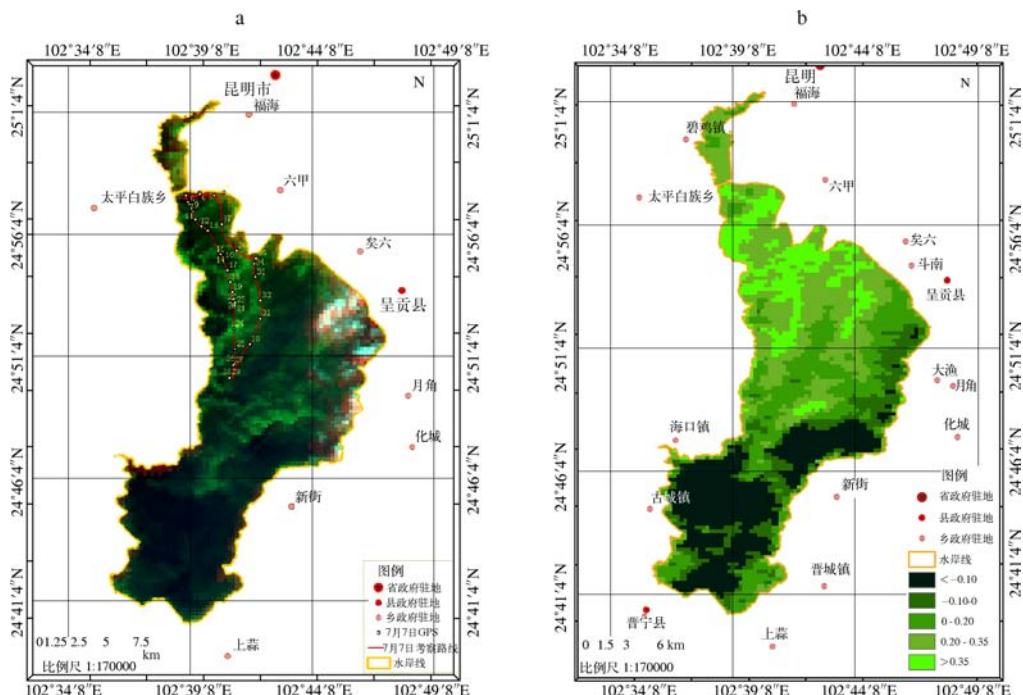


图 2 2008 年 7 月 7 日 MODIS 6,2,1 波段假彩色合成结果(a)和卫星 NDVI 分级(b)

Fig. 2 Band 6,2,1 false color composite image of Terra(a) and NDVI graduation(b) of MODIS on July 7th, 2008

2.3 归一化植被指数法识别滇池蓝藻水华信息

蓝藻水华与水体光谱特征有较大差异,其更接近于植被光谱特征,尤其在 MODIS-2 通道出现植被的“陡坡效应”之后形成近红外高台。由于滇池水体范围确定,蓝藻提取过程中可以排除滇池周边植被的干扰,因

此如何区分蓝藻与水体,特别是浑浊水体的光谱特征,是利用 MODIS 数据成功提取蓝藻水华分布信息的关键^[28-30]. 归一化差异植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是目前应用效果较好的植被指数方法之一,蓝藻水华的光谱特征与植被的光谱特征相似,所以根据 NDVI 能够有效地提取蓝藻水华的相关信息,NDVI 被定义为红光波段和近红外波段两波段的归一化比值^[31]. 即:

$$NDVI = (RED - NIR) / (RED + NIR)$$

式中:NIR 和 RED 分别代表近红外波段和红光波段的反射率. 针对 MODIS 卫星遥感资料的算法为: $NDVI = (CH2 - CH1) / (CH2 + CH1)$, CH1、CH2 分别为 MODIS 的通道 1 和通道 2 的反射率值. 计算结果显示: NDVI 值大于 -0.1 的区域为蓝藻水华区域. 然后按照星地准同步观测实验的结果比对, 对应蓝藻水华不同的覆盖程度, 将指数进行分级, 并赋予不同颜色(图 2b, 以 7 月 7 日为例).

2.4 真实性检验及滇池蓝藻水华不同覆盖程度的遥感参数指标

2008 年 7 月 7 日, 在滇池开展了蓝藻水华星地同步观测实验, 水面观测路线见图 2a 的红线, 结果显示: NDVI 值在 -0.1 至 0.2 时蓝藻水华为轻度, 水华淡薄, 丝状, 像元内蓝藻水华覆盖度为 0~30%; NDVI 值在 0.21~0.4 时蓝藻水华为中度, 水华较浓密, 像元内蓝藻水华覆盖度为 31%~80%; NDVI 值大于 0.4 时蓝藻水华为重度, 水华浓厚, 像元内蓝藻水华覆盖度为 81%~100%. 其强度分级结果见图 2b, 相比而言, 图 2b 中的蓝藻分布范围略小于图 2a, 存在一定程度的面积缩小化. 尤其是对于蓝藻强度不高的区域, 这是由于 NDVI 源于用于植被识别的应用, 而当水面蓝藻不是很密集时, 类似于植被光谱曲线特征的“陡坡效应”就不会很明显, 此时利用 NDVI 值就不能很好地识别蓝藻区域. 也就是说, 我们监测的面积比实际的面积略小.

2.5 滇池蓝藻水华暴发与降水的关系

为了解蓝藻水华暴发与气象条件的关系, 本文统计了 2008 年遥感监测到的蓝藻水华面积和当日的气象条件(表 1、图 3), 发现蓝藻暴发日的降水量基本都为零(如: 7 月 7 日、7 月 30 日、8 月 22 日), 但降水量为零的日子, 蓝藻水华不一定暴发. 在阴雨天, 滇池上空被云覆盖, 虽然无法得到水体光学遥感数据, 无法监测到阴雨天滇池蓝藻水华的实际发生面积, 但通过大量的实地调查和观察发现, 在阴天和雨天, 水华面积和强度都是很小, 只集中在北部的水华常年聚集区. 所以, 降水不利于蓝藻水华的产生.

表 1 水华面积与气象条件对比^{*}

Tab. 1 Algal bloom area contrast with the meteorological conditions

日期 (月. 日)	平均气温 (℃)	最高气温 (℃)	平均水温 (℃)	日降水量 (mm)	日平均 风速(m/s)	日照时数 (h)	水华面积 (km ²)
5. 7	20.3	26.4	18.3	-	3.0	10.6	2.70
5. 13	17.6	22.7	19.5	-	2.6	3.0	9.17
5. 27	22.9	28.4	20.3	-	3.6	12.0	8.25
6. 28	19.2	26.5	21.3	-	1.9	9.8	14.37
7. 7	19.0	27.1	20.6	-	2.0	10.5	196.37
7. 23	19.7	26.8	22.0	9.4	2.3	9.1	20.80
7. 30	19.6	26.8	22.2	-	1.9	7.6	181.09
8. 20	20.2	27.5	22.3	-	2.0	9.6	26.10
8. 22	21.7	28.6	22.8	-	2.1	9.0	86.70
10. 15	15.7	21.7	19.1	-	1.3	5.8	27.60
10. 22	18.4	25.4	19.2	-	2.3	9.7	31.50

* - 表示无降水.

2.6 滇池水华暴发与气温和水温的关系

通过计算, 水华面积与水华发生当日的平均气温或平均水温相关系数分别为 0.01 和 0.38, 都不能通过 95% 的信度检验, 相关性不显著(图 4, 图 5). 7 月 7 日和 7 月 30 日出现蓝藻水华暴发, 但当日的平均气温、最高气温和平均水温并不比其它日的高(图 4); 7 月 7 日和 7 月 30 日 12 时的蓝藻水华面积都比 14 时的大, 但 12 时的气温低于 14 时的气温(图 5).

因此认为:在滇池蓝藻水华暴发季节(6~9月),气温和水体温度完全能满足水华暴发需要,气温和水温不是滇池蓝藻水华暴发的关键因子。

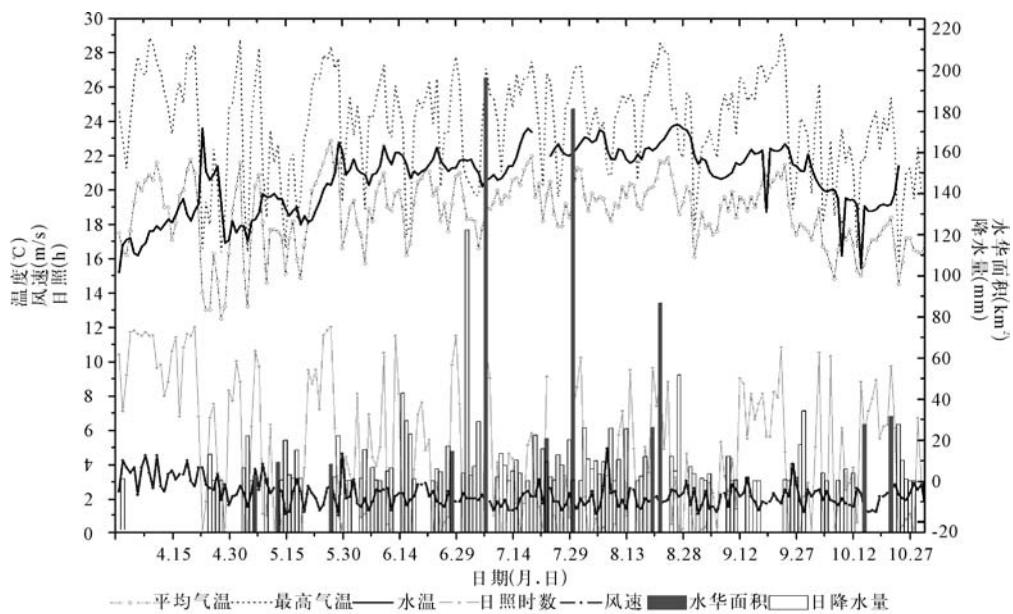


图3 水华面积与气象条件对比

Fig. 3 Algal bloom area contrast with the meteorological conditions

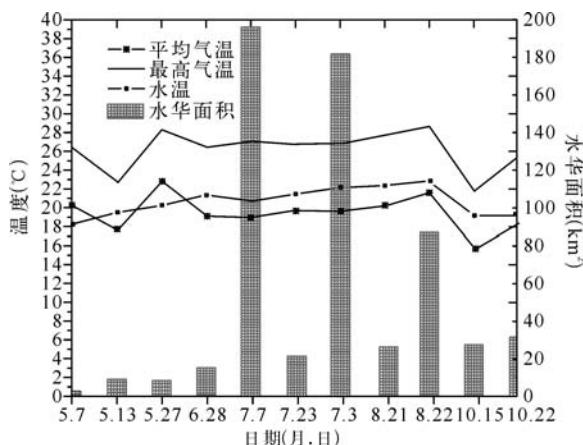


图4 水华发生日的温度变化

Fig. 4 Temperature change on algal bloom happen day

2.7 滇池蓝藻水华暴发与光照的关系

在蓝藻水华大面积发生的当日,都是天气由阴转晴或者光照时数比前几日有个突增(图3)。如:7月7日、7月30日天气正是从前期的阴雨天气突然转晴,光照持续5h以上,当日12时水华已暴发,面积分别达196.37km²、181.09km²,占湖面面积的2/3。

可以认为:天气转晴,且有连续4~5h光照,就利于蓝藻迅速上浮进行光合作用而形成水华。

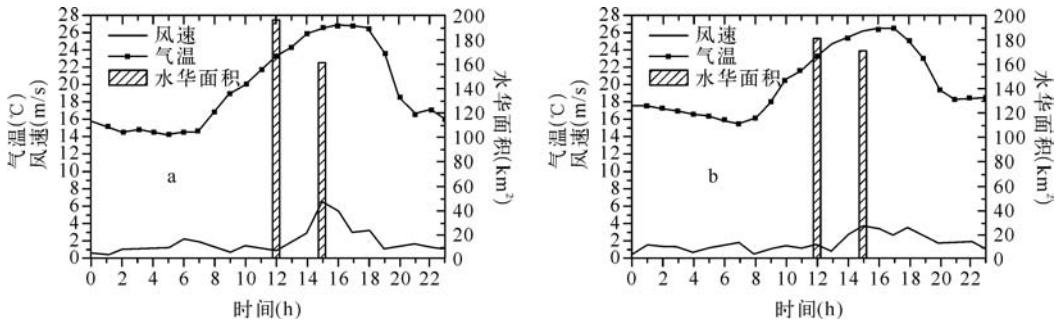


图 5 7月 7 日(a)和 7 月 30 日(b)滇池蓝藻水华面积及逐时气象要素变化

Fig. 5 Hourly meteorological factors variation and algal bloom area on July 7(a) and July 30(b)

2.8 滇池蓝藻水华暴发与风速的关系

水华暴发当日(7月7日、7月30日)的日平均风速在2.0m/s(表1). 在水华面积达到最大时, 风速都是小于2.0m/s, 之后随着风速增大, 水华面积变小(图5). 7月7日、7月30日天气晴朗, 日照充足, 从上午8时到下午15时, 温度稳步上升, 但15时的水华面积并不随气温的上升和光照持续而比12时的面积增大, 反而比12时的水华面积大幅度下降, 其原因可能就是风速的增大. 这两天, 13时前, 风速不足2m/s, 但是到了15时, 风速分别上升到6.7m/s和3.9m/s(图5).

因此可以认为: 天气转晴, 且有连续4~5h光照和小于2.0m/s的风速时, 就会使得蓝藻迅速上浮进行光合作用, 暴发水华.

3 讨论与结论

3.1 滇池蓝藻水华光谱特征

滇池蓝藻水华光谱特征表现为: ① 在380~700nm波段范围, 当蓝藻水华覆盖程度变化时, 相同波段的反射率变化不明显, 且都在435nm、620nm和675nm处存在吸收峰, 在550nm处存在反射峰. ② 在近红外波段具有类似于植被光谱曲线特征的“陡坡效应”, 在700~940nm波段范围, 反射率随蓝藻水华覆盖程度增加而增大. ③ 710nm附近存在反射峰, 该反射峰值随蓝藻水华覆盖程度增加而增大, 且峰值位置向长波方向移动. ④ 在940~1080nm波段范围内, 反射率随蓝藻水华覆盖程度增加而增大, 波动也逐渐增大. 这与李炎和Ma Ronghua^[1,3,27-29]的结论基本一致. 这一研究结果可应用于滇池蓝藻水华分布及覆盖程度、蓝藻生物量密度的遥感估算等方面.

3.2 假彩色合成法与归一化植被指数法识别滇池蓝藻水华信息及其比较

本文分别研究了用MODIS卫星6、2、1波段资料的假彩色合成法和归一化植被指数法识别滇池蓝藻水华信息. 不论是假彩色合成法或归一化植被指数法, 两者都能快速地获得蓝藻水华的监测结果. 结果基本符合水华的实际分布, 基本能满足对滇池管理部门的服务需求. MODIS数据可以用于内陆水体藻类水华监测.

结果表明: 通过MODIS卫星6、2、1波段资料的假彩色合成, 能基本反映蓝藻的大体分布信息. 随着蓝藻水华覆盖度的增加, 假彩色合成法的颜色也从暗绿渐变到亮绿, 具有较好的视觉效果, 主要表现为: ① 蓝藻水华区域与无水华区域对比明显, 易于目视解译; ② 具有较为真实的颜色表现能力, 蓝藻水华为绿色, 无水华区域为黑色.

归一化植被指数NDVI值大于-0.1的区域, 为水华发生的区域. 随着蓝藻水华覆盖度的增加, NDVI值从-0.1逐渐增大到0.8. 经过卫星和水面准同步观测检验, 确定如下的分级指标: NDVI值在-0.1至0.2时蓝藻水华为轻度, 水华淡薄, 丝状, 像元内蓝藻水华覆盖度为0~30%; NDVI值在0.21~0.4时蓝藻水华为中度, 水华较浓密, 像元内蓝藻水华覆盖度为31%~80%; NDVI值大于0.4时蓝藻水华为重度, 水华浓厚, 像元内蓝藻水华覆盖度为81%~100%.

但是, 通过对这两种方法发现: 波段的假彩色合成能基本反映蓝藻水华的大体分布信息, 假彩色合成

法具有直观的优点,但是其直方图拉伸后的色调效果可能因人而异,由于 Terra 卫星和 Aqua 卫星观测时间不同,导致影像在处理后存在色彩差异,给对比研究工作带来不利影响。植被指数法则克服了这一缺点,但它在确定水华分布区的 NDVI 阈值上目前还存在不确定性,需要进一步验证;由于归一化植被指数法的建立是针对陆地植被而言,不能有效识别低密度蓝藻水体,因此造成归一化植被指数法监测的面积略小于假彩色合成法的面积。

因此,必须对归一化植被指数进行改进,建立归一化蓝藻指数(Normalized Difference Algal Bloom Index, NDABI),引入针对水体特性的调节参数,以达到抑制背景水体及泥沙的影响以及要有较好的抗大气干扰能力,使其得到的结果不论是分布范围还是蓝藻强度要能较为真实地反映蓝藻水华情况。

另外,研究区蓝藻暴发的关键期正是雨季,阴、雨和多云天气偏多,时常存在云噪声,不利于晴空资料的获取,影响蓝藻水华高发时期的日常遥感监测顺利进行。特别是蓝藻暴发的突然性,更要求我们找到去除薄云等噪声的系列办法,和采用多源数据的方法,比如应用 FY3A 资料和中巴卫星资料,以真正实现多源数据的蓝藻监测。

此外,大量硅藻导致较高叶绿素 a 含量,但并不一定出现蓝藻水华现象,因此,要想应用 MODIS 数据获取较为准确的蓝藻暴发空间分布,在今后的研究中要更精细地结合利用野外实测验证数据及其它高光谱分辨率的影像数据。下一步要在获得实测数据的基础上,建立估测蓝藻确切含量的估算模型,并进行模型参数与蓝藻含量的相关关系研究,排除时间、环境等因素影响,建立模型的监测参数体系,进而实时定量的监测出蓝藻的含量。

本研究目前未考虑漂浮于水面的水草对监测结果的影响,但考察经验表明,由于水草对风浪有抑制作用,水草区域的风浪较周围小,若水草周围有水华,那水草区域内必有水华。但是在没有水华时,水草区域可能被误认为水华,因此在以后的工作中,应该对相对面积较大的水草区定位,以排除其对监测结果的影响。

关于滇池蓝藻水华的监测,刘丽萍^[1]应用 Lansat TM 资料做过监测滇池蓝藻的试验。但由于 Lansat TM 资料重访周期长等原因,成果未能应用于日常业务。MODIS 的光谱分辨率高,而且观测周期短,数据可以免费获得,可以对对象进行快速连续的监测。我单位具有 MODIS 卫星数据接收站,2008 年已将以上研究结果应用于日常滇池蓝藻监测业务,服务于当地政府和环保部门。

3.3 滇池蓝藻水华暴发的关键气象因子和指标

我们根据在实地做的大量调查和观察,发现在阴天和雨天,水华面积很小;晴天时水华面积会突然增大。据此我们提出气象条件是蓝藻水华暴发的关键因素的假设。在此假设前提下,对导致滇池蓝藻水华暴发的气象因子和指标进行了细致分析,旨在为今后突发水华事件中快速获取蓝藻分布信息,为建立实时监测和预警系统奠定基础。

结果表明:滇池蓝藻水华暴发的关键时期是 6~9 月份,导致滇池蓝藻水华暴发的关键气象因子是光照和风速。天气转晴,且有连续 4~5h 光照和小于 2.0m/s 的风速时,就有可能导致蓝藻水华暴发。气温和水温不是滇池蓝藻水华暴发的关键因子。阴天和雨天不利于水华形成。结果支持本文提出的“气象条件是导致蓝藻暴发的关键因素”的假设。

本文与文献^[24,26,32~34]的结果不同点在于:(1)导致蓝藻暴发的关键气象因子和指标的结论不同。文献^[26]认为,温度偏高有利于其生长发育和暴发,但未给出具体指标。本文认为导致蓝藻暴发的关键气象因子是光照和风速。天气转晴,且有连续 4~5h 光照和小于 2.0m/s 的风速时,就会使得蓝藻迅速上浮进行光合作用,暴发水华。气温和水温不是滇池蓝藻水华暴发的关键激励因子。阴天和雨天不利于水华形成。(2)有利于蓝藻生长发育和暴发的界限温度也不同。在滇池,蓝藻暴发时的日平均气温在 19~21℃,最高气温在 25~29℃ 之间。这样的温度值只相当于太湖地区 6~9 月的最低气温值。滇池蓝藻暴发时的气温和水温值,在太湖是不太可能引发蓝藻水华暴发的。所以,滇池与太湖蓝藻暴发的气象指标体系应具有明显的地方性。

朱永春、杨清心等认为^[32~33],对藻类的迁移聚集作用主要取决于风速大于还是小于 3m/s 的临界风速。本文认为,风速不能单独做为导致水华暴发的气象指标,小于 2m/s 风速有利于蓝藻暴发也是在有连续 4~5h 光照的前提下。

本文认为在滇池,蓝藻水华暴发的关键期是 6~9 月,水体中蓝藻生物量已累积到相当的量。这期间最高

气温在22~30℃之间，水温在20℃上下，都能满足蓝藻的生长，但由于这时期平均每月的雨日数19~21d，阴雨天数还更多，大量累积的蓝藻都只是均匀分布在水体中。一旦天气转晴，只要有连续4~5h的光照，使得蓝藻迅速上浮进行光合作用。如果此时风速≤2m/s，湖面无浪，不会阻断蓝藻不断上浮，并在微风的作用下，蓝藻在水面不断聚拢，这样的气象条件组合就极易引起蓝藻水华暴发。若此时的风速>2m/s，光照虽然使得蓝藻迅速上浮进行光合作用，但大风使水搅动，干扰蓝藻上浮和聚拢，从而减小水华的覆盖程度。

由于没有阴天或雨天的蓝藻的实际发生面积，本研究只用晴天时卫星遥感监测到的水华面积来分析蓝藻水华暴发的气象指标，客观上存在一定的局限性，但是在实际工作中通过大量的实地调查和观察，发现在阴天和雨天，水华面积都是很小，甚至没有。所以用遥感监测到的水华面积来分析滇池蓝藻暴发指标是可行的，但应多积累几年资料做进一步的分析研究。

致谢：本研究是在项目主持人国家卫星气象中心朱小祥研究员，技术负责人刘诚研究员、韩秀珍博士、武胜利博士和郑伟博士的指导下完成的，在此表示感谢。

4 参考文献

- [1] 刘丽萍. 滇池水华特征及成因分析. 云南环境科学, 1999, (5):36-37.
- [2] 李 炎, 商少凌, 张彩云等. 基于可见光与近红外遥感反射率关系的藻华水体识别模式. 科学通报, 2005, **50**(22): 2555-2561.
- [3] Hu C, Muller-Karger FE, Taylor C et al. Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**:311-321.
- [4] 段洪涛, 张 柏, 刘殿伟等. 查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素a响应关系研究. 红外与毫米波学报, 2006, **25**(5):355-359.
- [5] 杨顶田, 潘德炉. 蓝藻的卫星遥感研究进展. 国土资源遥感, 2006, **4**:1-5.
- [6] Prangsma GJ, Rozekrans JN. Using AVHRR HRPT imagery in assessing water quality parameters. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, **10**(4-5):811-818.
- [7] Lefelier RM, Abbott MR. Analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the moderate resolution imaging. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**(2).
- [8] Stumpf RP, Megan LF. Use of AVHRR imagery to examine long-term trends in water clarity in coastal estuaries: example in Florida Bay. In: Kahru M, Brown CW eds. Monitoring algal bloom: New techniques for detecting large-scale environmental change. New York: Spring Velag, 1997:3-23.
- [9] Levine SN, Livingston GP. Detection of cyanobacterial blooms using remote sensing. Report for 2002VT5B, 2002.
- [10] Kutser T, Sipelgas L, Kallio K. Bio-optical modeling and detection of cyanobacterial blooms Baltic Sea Optics. Workshop-Stockholm, 2001.
- [11] 胡德永. 陆地卫星TM观测到渤海湾赤潮. 遥感信息, 1993, (3):11-14.
- [12] 李旭文. 太湖梅梁湖湾蓝藻生物量的遥感估算. 国土资源遥感, 1995, (2):23-28.
- [13] 黄家柱, 赵 锐. 卫星遥感监测太湖水域蓝藻暴发. 遥感信息, 1999, **4**:43-44.
- [14] 胡 雯, 吴文玉, 孔庆欣. 用FY-1C/CAVHRR数据估算巢湖蓝藻叶绿素的含量. 南京气象学院学报, 2002, **25**(1): 124-128.
- [15] 王海君, 李云梅. 用ASTER数据监测梅梁湖湖区蓝藻分布的方法. 南京师大学报(自然科学版), 2005, **28**(1): 103-106.
- [16] Ma Ronghua, Tang Junwu, Dai Jingfang. Bio-optical model with optional parameter suitable for Lake Taihu in water color remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**:4305-4328.
- [17] 闻建光, 肖 青, 柳钦火等. 基于混合光谱理论的太湖水体叶绿素a浓度提取. 地理科学, 2007, **27**(1):92-97.
- [18] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法. 湖泊科学, 2008, **20**(2):145-152.
- [19] 周立国, 冯学智, 王春红等. 太湖蓝藻水华的MODIS卫星监测. 湖泊科学, 2008, **20**(2):203-207.
- [20] 徐京萍, 张 柏, 李 方等. 基于MODIS数据的太湖藻华水体识别模式. 湖泊科学, 2008, **20**(2):191-195.
- [21] 陈 云, 戴锦芳. 基于遥感数据的太湖蓝藻水华信息识别方法. 湖泊科学, 2008, **20**(2):179-183.
- [22] 王得玉, 冯学智, 周立国等. 太湖蓝藻爆发与水温的关系的MODIS遥感. 湖泊科学, 2008, **20**(2):173-178.
- [23] 梅长青, 王心源, 彭 鹏. 应用MODIS数据监测巢湖蓝藻水华的研究. 遥感技术与应用, 2008, **23**(3):328-332.

- [24] 金相灿,储昭升,杨波等.温度对水华微囊藻及孟氏浮游蓝丝藻生长、光合作用及浮力变化的影响.环境科学学报,2008,28(1):50-55.
- [25] 张晓峰,孔繁翔,曹焕生等.太湖梅梁湾水华蓝藻复苏过程的研究.应用生态学报,2005,16(7):1346-1350.
- [26] 任健,蒋名淑,商兆堂等.太湖蓝藻暴发的气象条件研究.气象科学,2008,28(2):221-226.
- [27] 唐军武,田国良,汪小勇等.水体光谱测量与分析 I:水面以上测量法.遥感学报,2004,8(1):37-44.
- [28] Dallmo G, Gitelson AA, Rundqvist DC et al. Assessing the potential of Sea WIFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. *Remote Sensing and Environment*, 2005, 96: 176-187.
- [29] Reinart A, Kutsar T. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea. *Remote Sensing and Environment*, 2006, 102:74-85.
- [30] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K et al. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. *Remote Sensing and Environment*, 2002, 79:51-59.
- [31] Liu HQ, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmosphere noise IEEE. *Trans Geosci Remote Sensing*, 1995, 33:457-465.
- [32] 朱永春,蔡启铭.风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究.湖泊科学,1997,9(2):152-158.
- [33] 杨清心.太湖水华成因及控制途径初探.湖泊科学,1996,8(1):67-74.
- [34] 武胜利,刘诚,孙军等.卫星遥感太湖蓝藻水华分布及其气象影响要素分析.气象,2009,35(1):18-23.