

巢湖水华遥感监测与年度统计分析研究

朱利,王桥,吴传庆,吴迪

环境保护部卫星环境应用中心,北京 100094

摘要:介绍了巢湖蓝藻水华的日常遥感监测方法与流程,开展了基于日常监测的年度统计分析,为水华环境管理提供了科学依据。首先分析了蓝藻水华与正常水体的光谱差异,利用蓝藻水华在近红外波段的“陡坡效应”,基于NDVI方法开展水华日常遥感监测。基于日常监测开展水华年度统计分析,获得水华最早发生日期、最晚发生日期、最大发生面积等,并以水华发生频率、水华起始日期和水华持续时间来分析巢湖一年内高发区、发展趋势及持续时间等时空分布规律。研究表明2010年巢湖水华的高发区域在巢湖西北部水域,水华持续天数最长的区域是巢湖西北和中部部分区域,水华先在西部沿岸聚集,随时间推移向东部和中部扩散,巢湖西南、中部和东南沿岸是最后新增的水华区域。

关键词: 蓝藻水华; MODIS; NDVI; 年度统计分析; 巢湖

中图分类号: X87

文献标志码: A

文章编号: 1002-6002(2013)02-0162-05

Monitoring and Annual Statistical Analysis of Algal Blooms in Chaohu Based on Remote Sensing

ZHU Li, WANG Qiao, WU Chuan-qing, WU Di

Satellite Environment Centre, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China

Abstract: It was introduced that the method and technological process of algal bloom of Chaohu daily monitoring and annual statistical analysis used remote sensing in order to support the water environment management in China. First, the spectral difference between the algal bloom and the normal water was analyzed and the steep slope effect in NIR band was used in NDVI method to detect the algal bloom in daily monitoring. Then the annual statistical analysis was based on daily monitoring to obtain the earliest date, the late date and the biggest case of area for the algal bloom in Chaohu. The temporal and spatial algal bloom distribution characteristic such as high frequent area, development trend and existence time was analyzed using three parameters: the algal bloom annual frequency, bloom initial date and duration. The results indicated that the most frequency bloom region is northwestern lake, the longest duration region is northwestern and central lake, and bloom began in western areas, developed to eastern and central areas and appeared in the southwestern and southeastern areas lastly.

Key words: algal bloom; MODIS; NDVI; annual statistical analysis; Chaohu

据统计,我国近3 000个1 km²的较大湖泊中普遍存在富营养化或者受富营养化的威胁。水体的富营养化导致蓝藻异常增殖形成水华,使水体腥臭难闻,破坏水体生态系统,严重威胁湖泊周边的饮水安全。除此之外,蓝藻水华产生的藻毒素通过食物链进入到水生动物和人体中,严重威胁人体健康。

传统的蓝藻识别多是实地采样,在实验室内通过显微镜对水样中藻类的形态进行观测和识别,通过显微镜计算藻类细胞数目或通过细胞体积估算细胞数目实现藻类密度测量。这种方法可以较好地应用于空间差异较小的小型水体,但对

于较大面积水域而言,该方法不仅耗时耗力,而且不能准确地反映蓝藻的空间分布特征和时间序列变化规律,具有一定的局限性。遥感具有大范围、快速、连续、动态、可视、大信息量的特点,利用遥感技术对大型内陆水体蓝藻水华进行识别,可以较好地反映蓝藻水华的时空差异性和变化规律。目前利用遥感技术监测水华主要是遥感影像人工判读方法和植被指数方法。传统的遥感影像人工判读方法通过波段彩色合成和图像拉伸,目视识别水华分布,其缺点是不能自动识别水华,也不能判定水华分布的强弱等级,人为因素大,效率低;基于NDVI等植被指数方法判别水华,利用蓝藻水

收稿日期: 2011-10-27; 修订日期: 2011-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(41101378, 41001245); 国家水专项课题(2009ZX07527-6)

作者简介: 朱利(1978-),男,安徽来安人,博士,工程师。

华具有与植被相似的光谱特征^[1-2],通过正常水体和蓝藻水华 NDVI 差别来识别水华。目前卫星遥感技术已经成为国内环保部门快速监测蓝藻水华的重要手段^[3-4]。在湖泊富营养化水平较高的情况下,蓝藻水华发生已成为常态,环境管理重点关注的是水源地和重点景湖区蓝藻水华发生的预测预报。例如,若能提前预知蓝藻水华在取水口区域聚集降解,就有足够时间采取水源调度和制水工艺的改进与强化等措施,减少蓝藻水华带来的生态危害和健康风险,避免发生供水危机,保障供水安全^[5]。遥感可以通过历史影像回顾以往水华发生事件,在多年多时相水华日常监测基础上可以分析出蓝藻水华发生的空间规律,为蓝藻水华预测预报提供重要技术支撑。

该文主要介绍如何利用卫星遥感技术开展蓝藻水华日常监测,并以 2010 年巢湖蓝藻水华年报分析为例,介绍如何通过多时相遥感分析来获得蓝藻水华高发区、持续时间以及水华移动趋势等规律。

1 实验部分

1.1 蓝藻水华光谱特征分析

巢湖和太湖的水华藻类种蓝藻为最优势门类,其中铜绿微囊藻和水华微囊藻为优势藻种,可以通过对太湖的水华藻类实测光谱来分析巢湖的蓝藻水华、水草和水体的光谱特征。图 1 为 2006 年 10 月于太湖获得的野外实测光谱数据,包括 1 个高富集浓度蓝藻水华、1 个一般富集浓度蓝藻水华、1 个飘叶植物(水草)和 2 个正常水体的光谱曲线。

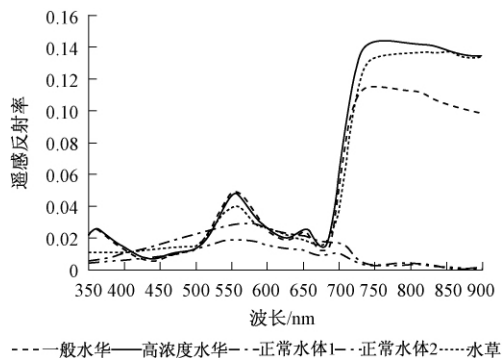


图 1 蓝藻水华和正常水体的遥感反射率光谱曲线

由图 1 可知,水华分布的水体和正常水体的光谱有 2 个明显不同,不同富集程度的水华也有

不同。在 400 ~ 560 nm 的蓝绿光范围内,水华的光谱反射率比正常水体低,或者说吸收率较高,而且变化较快,在 550 nm 处水华有明显反射峰,正常水体则没有,水华 550 nm 的反射峰是由于叶绿素 a 和胡萝卜素的弱吸收和细胞的散射作用的共同影响,在 620 nm 处存在蓝藻水华特有的藻青蛋白的吸收引起的反射谷,在 650 nm 处存在反射峰,夹在 2 个反射谷之间形成反射峰,正常水体和水草无此特征,700 nm 以后,水华均有明显的“陡坡效应”,与陆地表面的植被相似,且富集程度越大,峰值越大,陡坡效应越明显,而正常水体在近红外波段反射率下降,无此效应。

1.2 基于 NDVI 的蓝藻水华遥感识别

从蓝藻水华的光谱特征分析可知,水华与水体最明显的光谱差异是在近红外波段是否有陡坡效应,且富集度越大的水华陡坡效应越明显。NDVI 是目前应用最广泛的植被指数方法,其定义为红光和近红外波段 2 个波段的归一化比值,可以较好反映陡坡效应^[6],其计算公式:

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red})$$

式中 ρ_{nir} 和 ρ_{red} 分别代表近红外波段和红光波段的反射率。

通过对卫星遥感数据的预处理,可得到水体区域内地物的 NDVI 指数。NDVI 为正值时表明水面有蓝藻覆盖,蓝藻密度越大,NDVI 值越大,可以选择适当阈值来提取蓝藻水华的分布范围。可以应用 NDVI 方法的卫星遥感数据只需要包括红光和近红外波段即可。但是,水生植被也具有明显的陡坡效应,应用 NDVI 方法无法区分蓝藻水华和水生植被,常用于水华监测的多光谱数据,如 Landsat5 TM、HJ-1 CCD、MODIS(250m)均没有蓝藻特有的藻青蛋白的特征反射波段(620nm 处)设置高光谱分辨率的波段,水域中的水生植被易被误判为水华。由于水生植被相对蓝藻水华位置固定,可以根据先验知识或高光谱数据先提取水生植被的分布区域,然后在非水生植被的区域识别蓝藻水华。

1.3 卫星遥感数据处理方法

该文使用的遥感数据为 MODIS 数据,具有很好的信噪比,在我国水环境遥感方面应用范围较广^[6-8]。MODIS 是 EOS-AM 系列(Terra)和 PM 系列(Aqua)卫星的主要探测仪器,具有 36 个光谱通道,地面分辨率分别为 250 m(2 个波段)、500 m(5 个波段)和 1 000 m(其余波段),视幅宽

度为 2 330 km, 每日可获取 2 次以上的光学数据。MODIS(250 m) 数据仅含有红光和近红外波段(波段 1 和 2), 可以应用 NDVI 方法监测蓝藻水华, 其相对较高的空间分辨率(250 m) 和时间分辨率(1 天 2 次白天过境数据), 比较适合太湖、巢湖等大中型内陆水体的日常蓝藻水华监测。

环境保护部卫星环境应用中心具有 MODIS 数据接受系统, 可根据选择研究区和对应收索条件查询获得影像, 剔除明显有云全覆盖或数据质量较差的数据; 进行图像裁剪和几何校正, 利用 ENVI 软件裁剪研究区域, 并通过其 MODIS 几何校正模块对数据进行几何校正; 进行 MODIS 数据的辐射校正, 获得目标区域大气顶层(TOA) 反射率; 利用云层发射率较大的光谱特征, 识别研究区水域上空的云, 并加以剔除; 最后, 进行水陆分离, 由于水华、水生植被与岸边的陆生植被在红光、近红外波段的光谱特征相似, 该研究采用先验获得的研究区域湖体矢量边界进行水陆分离, 该方法需要 MODIS 几何校正精度在 2~4 个像元之内。利用水环境应用系统 WATERS 可以快速进行以上 MODIS 数据业务化处理^[6]。

1.4 水华日常遥感监测流程

目前, MODIS(250 m) 的数据已经应用到太湖和巢湖水华日常遥感监测中, 而 HJ-1 CCD 具有较高的空间分辨率(30 m), 也应用到滇池和三峡库区的水华日常遥感监测中。两者日常监测流程相类似, 下面以 MODIS(250 m) 数据监测水华为例。

首先输入 MODIS(250 m) 几何精校正 TOA 反射率图像, 计算图像的归一化植被指数; 其次将水体分布图和水草分布图叠加得到非水草区域的水体分布图, 并利用掩膜得到非水草区域的水体归一化植被指数分布图; 再次, 基于归一化植被指数阈值, 将上一步得到的非水草区域水体的归一化植被指数大于阈值的像元判断为水华, 小于阈值的则判断为普通水体, 得到水华和普通水体的二值图, 进而得到水华和其他区域的二值图; MODIS(250 m) 采用通道 1(R) 2(G) 1(B) 合成为背景图, 水华二值图叠加后生成水华遥感监测专题图; 最后, 统计水华像元数, 进而获得水华分布的面积及占总湖区面积的比值, 加入专题图形成水华监测专题报告。

1.5 蓝藻水华遥感监测年度统计与分析方法

利用遥感手段开展高频率蓝藻水华日常监

测, 在此基础上可以在年尺度或月尺度统计和分析相关规律, 获得蓝藻水华高发区、持续时间及水华移动趋势等有益信息, 为蓝藻水华预测预报提供统计规律^[9]。为了开展年度统计分析, 特定义以下几个参数:

水华发生频率(%): 蓝藻水华分布天数/全年天数, 反映了该地区蓝藻聚集成灾风险, 反映该地区水华易发程度大小。

水华起始日期: 全年该地区第一次发生水华的日期, 能反映湖区水华最早出现和最晚出现的区域分布, 进一步判断水华的分布转移规律。

水华持续时间(天): 全年该地区最后一次发生水华的日期与全年中该地区第一次发生水华的日期之间的天数, 能反映该地区水华存在的时间长短, 也能侧面反映该地区水华易发程度大小。

水华年度统计与分析的技术流程: ①输入全年所有有效的日水华遥感监测结果(二值图, 有水华分布的像元值为 1, 其余为 0), 进行空间叠加, 叠加后的结果除以一年中的总天数(闰年为 366 d, 其余为 365 d), 得到全年发生频率结果图; ②把输入的日水华遥感监测结果转化为水华发生日期结果(二值图, 有水华的像元值为水华当年发生的日期天数, 其余为 0); ③所有全年的水华发生日期结果进行空间叠加取最小操作, 获得全年水华最早发生日期结果(空间叠加结果, 有水华像元的像元值为该区域全年中最早一次发生水华的日期天数); ④所有全年的水华发生日期结果进行空间叠加取最大操作, 获得全年水华最晚发生日期结果(空间叠加结果, 有水华像元的像元值为该区域全年中最后一次发生水华的日期天数); ⑤全年水华最晚发生日期天数与全年水华最早发生日期天数差, 再加上 1, 即为全年该区域水华持续时间; ⑥按标准, 把全年水华发生频率结果、水华起始时间结果和水华持续时间结果分级, 制作专题图和报告, 并统计相关结果。

2 结果与分析

2.1 研究区概况

该文针对巢湖进行研究。巢湖位于安徽省中部, 是中国第五大淡水湖, 形态呈鸟巢状, 东西长 5 415 km, 南北平均宽 1 511 km, 水域面积 760 km², 平均水深约 3 m, 最大水深为 6.78 m, 主要有南淝河、派河、杭埠河、丰乐河、柘皋河和白石山河

等 6 条河流汇入,由裕溪河注入长江。20 世纪 80 年代以来,由于上游生态环境的恶化,造成大面积的水土流失(大量土壤带入湖内),加上周围城市(特别是合肥市)污染物的大量注入,使巢湖水质遭到严重破坏。巢湖的主要污染指标为总磷量和总氮量,作为国家重点治理的“三江三湖”之一,目前已处在严重的富营养化状况,经常出现密集的蓝藻水华,严重影响取水安全和水生态系统,制约周边城市的社会经济发展。夏季巢湖水华暴发频繁,蓝藻在数量和时空分布上居绝对优势,占年均藻类的 90% 以上,其中主要藻类为铜绿微囊藻和水华微囊藻,其次为螺旋鱼腥藻^[5,10]。

2.2 巢湖水华日常监测及数据统计

据以往监测表明,巢湖蓝藻水华很少在冬季发生,巢湖的日常水华监测时间为 4—11 月。2010 年水华一直持续到 12 月下旬。图 2 为巢湖日常水华监测结果实例。2010 年 8 月 9 日 11:02,巢湖部分水域为云所覆盖,西北部沿岸水域监测到水华,面积估算约 40.19 km²,占巢湖总面积的 5.27%。

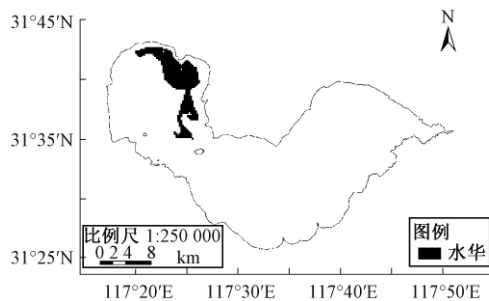


图 2 2010 年 8 月 9 日 11:02 巢湖水华分布图

统计 2010 年 4—12 月的日常水华监测结果,巢湖的 MODIS 影像总共 258 景,其中有效影像 163 景,占总数据的 63.18%,有云层覆盖的无效数据 95 景,占总数据的 36.82%。其中 2010 年 5 月和 9 月由于天气不晴朗导致无法遥感监测水华的数据最多,分别有 17 景。在有效数据中,监测到水华的有 66 景,占有效数据的 40.49%,未监测到水华的有 97 景,占有效数据的 59.51%。

2.3 2010 年年度统计分析

在 2010 年巢湖水华日常监测基础上,该文开展了水华年度统计分析,图 3 为巢湖水华分布面积柱状图。该文具体统计了水华时间空间分布特性,通过分析水华发生频率分布、水华起始日期分布及水华持续时间,获得蓝藻水华高

发区、持续时间、移动趋势等,为环境管理提供技术支撑。

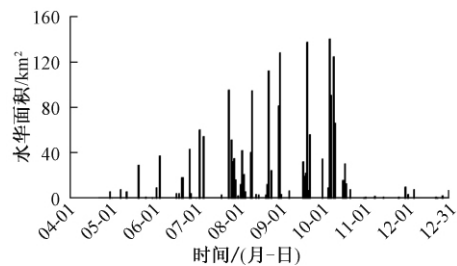


图 3 2010 年 4—12 月巢湖水华分布面积柱状图

由年度分析可知:2010 年巢湖水华主要出现在 4—12 月,在监测到水华分布的 66 次中,8 月的次数最多,为 15 次;巢湖水体总面积约为 762 km²,2010 年最大水华面积没有超过巢湖水体总面积的 20%,有 9 次水华面积超过巢湖水体总面积的 10%,分布在 7—10 月,有 8 次水华面积介于巢湖水体总面积的 5%~10%,其余 48 次水华面积均低于巢湖水体总面积的 5%;2010 年水华最早出现于 4 月 29 日,面积约 5.63 km²,占巢湖总面积的 0.74%,主要分布在巢湖西北部区域。水华最晚出现于 12 月 26 日,面积约 1.875 km²,占巢湖总面积的 0.25%,主要分布在巢湖北部沿岸区域。2010 年 10 月 5 日监测到最大面积水华,面积约为 140 km²,占巢湖总面积的 18.37%,而 2009 年最大水华面积 121 km²,2010 年相比于 2009 年水华发生规模略有上升,最大水华发生面积上升了 15.5%。

由水华发生频率分布图(图 4)可知,2010 年巢湖水华的高发区域在巢湖西北部水域,巢湖东部和中部分区域很少出现水华聚集。

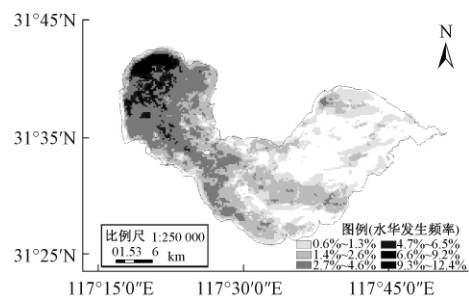


图 4 2010 年 4—12 月巢湖水华发生频率分布图

分析水华起始日期分布图(图 5)可知,水华发展趋势:先在西部沿岸聚集,随时间推移向东部和中部扩散,巢湖西南、中部和东南沿岸是最后新增的水华区域。

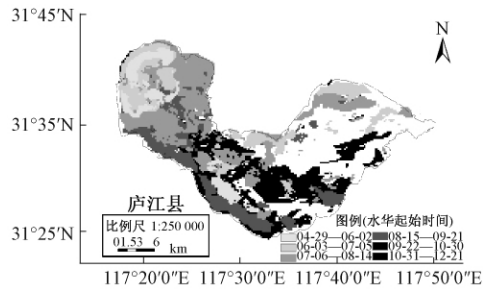


图5 2010年巢湖水华起始日期分布图

由水华持续时间专题图(图6)分析可知,2010年巢湖水华从4月持续到12月,水华持续天数最长的区域是巢湖西北和中部部分区域,最短持续天数的区域是中部和东部部分区域。

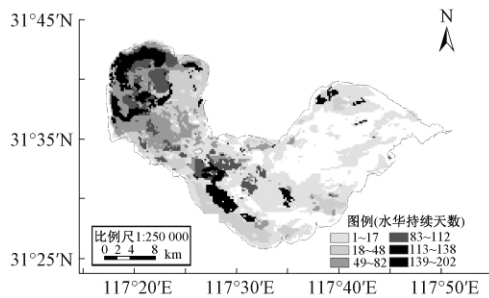


图6 2010年巢湖水华持续天数分布图

3 结语

从蓝藻水华光谱特征分析入手,介绍了基于NDVI的水华遥感监测方法和基于多时相遥感监测的水华年度统计分析方法。以巢湖为研究区,利用MODIS卫星遥感数据开展水华日常监测,在此基础上进行了2010年水华年度统计分析,获得了2010年巢湖蓝藻水华的发生频率、起始日期及持续时间,为水华预测预报提供了统计基础,为环境管理提供了有力的技术支持。但还需要进一步研究以解决以下问题:基于NDVI识别蓝藻水华受大气影响大,易受浑浊水体背景干扰,判别水华

的NDVI阈值不稳定,需要探讨构建新的蓝藻水华识别指数,保持指数阈值的稳定性,并能反映遥感像元内水华轻重程度;水华年度分析需要更多的多时相数据支持,一年的多时相统计分析还无法为蓝藻水华预测预警提供准确的时空分布规律。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨顶田,潘德炉. 蓝藻的卫星遥感研究进展[J]. 国土资源遥感, 2006(4): 1-5.
- [3] 吴传庆,王桥,杨志峰,等. 太湖水华的遥感分析[J]. 中国环境监测, 2007, 23(3): 52-56.
- [4] 李旭文. Landsat-7 SLC-OFF ETM 遥感数据下载及在太湖蓝藻水华监测中的应用[J]. 环境监测管理, 2009, 21(3): 54-57.
- [5] 孔繁翔,宋立荣. 蓝藻水华形成过程及其环境特征研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] 王桥. 基于环境一号卫星的生态环境遥感监测[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [7] 徐京萍,张柏,李方,等. 基于MODIS数据的太湖藻水华水体识别模式[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 191-195.
- [8] 李国视,张仲元,郑艳芬,等. MODIS影像的大气校正及在太湖蓝藻监测中的应用[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 160-166.
- [9] Zhu Li, Wu Chuanqing, Yao Yanjuan, et al. Spatial and temporal distribution variation and meteorological factors analyzing of algal blooms based on HJ-1 satellites in Lake Dianchi, China, 2009 [A]. 2010 IEEE International. Geoscience and Remote Sensing Symposium proceedings [C]. USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Geoscience and Remote Sensing Society, 2010: 2 769-2 772.
- [10] 朱利,姚延娟,吴传庆,张永军,等. 基于环境一号卫星的内陆水体水质多光谱遥感监测[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(2): 81-84.