

内蒙古乌梁素海“黄苔”暴发卫星遥感动态监测*

郑伟¹, 韩秀珍¹, 刘诚¹, 李云鹏²

(1: 国家卫星气象中心, 北京 100081)

(2: 内蒙古自治区气象局, 呼和浩特 010051)

摘要: 通过综合分析“黄苔”、芦苇、明水体和陆地等地物在 EOS/MODIS 图像上不同波段的光谱特征, 提出了利用 EOS/MODIS 可见光、近红外波段数据提取“黄苔”信息的方法。结合乌梁素海“黄苔”实地考察资料和高空间分辨率的中巴资源卫星 CBERS/CCD 数据对 MODIS 数据监测“黄苔”的结果进行了比对验证。研究表明, 本文提出的方法可以对“黄苔”进行有效的监测。同时提出了简单可行的去除程辐射影响的大气校正方法, 利用 MODIS 2008 年 5-10 月的数据对内蒙古乌梁素海的“黄苔”灾情进行了动态监测, 获得了乌梁素海“黄苔”灾情发生发展的特征信息, 乌梁素海在 2008 年 5 月初开始出现“黄苔”, 6-7 月份发生大面积“黄苔”暴发, 进入 8 月以后“黄苔”开始逐渐消退, 10 月份基本消失, 并初步分析了“黄苔”暴发的原因。

关键词: “黄苔”; MODIS; 乌梁素海

Satellite remote sensing data monitoring “Huang Tai” algae bloom in Lake Ulansuhai, Inner Mongolia

ZHENG Wei¹, HAN Xiuzhen¹, LIU Cheng¹ & LI Yunpeng²

(1: *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, P. R. China*)

(2: *Inner Mongolia Weather Bureau, Hohhot 010051, P. R. China*)

Abstract: The spectral characteristics of the “Huang Tai” algae, reed, water body and land in the EOS/MODIS image of Lake Ulansuhai Inner Mongolia were analyzed and the method of extracting the algae information was put forward based on visible, near-infrared data of EOS/MODIS. Compared with the field measured data and CBERS/CCD data with 19.5m spatial resolution, EOS/MODIS method was validated. At the same time, the simple and feasible method to remove the effects of path radiance was put forward in MODIS image’s atmospheric correction process. The results of algae dynamically monitoring using MODIS data started from May to October, 2008 showed that “Huang Tai” algae began to appear in Lake Ulansuha in early May 2008. During the period June to July, the algae bloomed, and the algae began to subside in August and disappeared in October.

Keywords: “Huang Tai” algae; MODIS; Lake Ulansuhai

乌梁素海位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内(图 1), 湖区处于北纬 40°36′-41°03′, 东经 108°43′-108°57′^[1], 库容量为 $2.5 \times 10^8 - 3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最大水深为 3m, 平均水深 1m^[2]。乌梁素海为 1850 年由黄河改道而形成的河迹湖, 是黄河流域最大的淡水湖, 我国八大淡水湖之一, 也是全球荒漠半荒漠地区罕见的大型草原湖泊。乌梁素海是河套灌区排灌水系的重要组成部分, 是 $8.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 农田退水和工业、生活废水的唯一承泄渠道。乌梁素海湿地生态系统对维护周边地区生态平衡起着相当重要的作用, 是我国北方候鸟重要的迁徙和繁殖地。

2008 年 5 月份中旬, 乌梁素海出现了大量的飘浮在水面的团块状黄色藻类, 散发出一种难闻的味道。研究表明该藻类是由绿藻门接合藻纲双星藻目双星藻科的几种丝状藻类组成, 主要是水绵、双星藻、转板藻三

* 国家自然科学基金项目: 基于风云三号卫星数据的太湖蓝藻监测模型研究(40804030)和中国气象局项目“蓝藻水体监测预警系统建设项目(一期)”联合资助。2009-08-31 收稿; 2009-11-19 收修改稿。郑伟, 男, 1981 年生, 博士; E-mail: azheng1125@163.com.

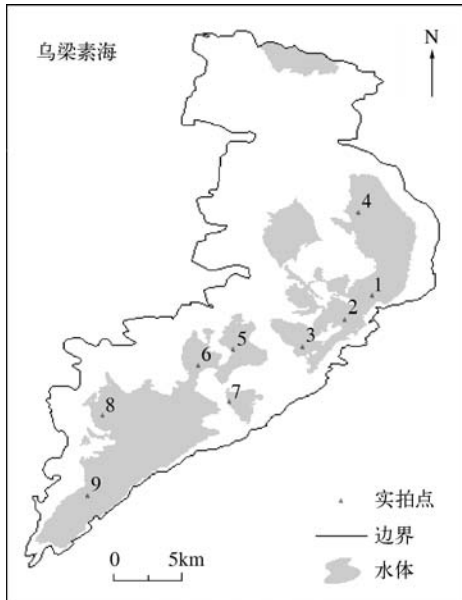


图1 乌梁素海示意图

Fig.1 Sketch map of Lake Ulansuhai

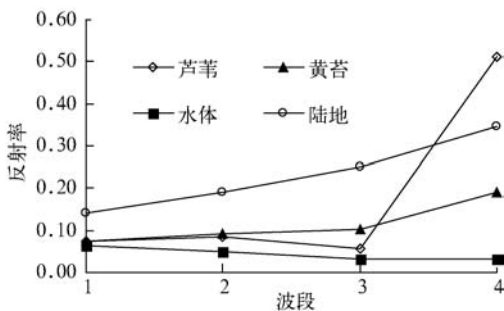


图2 乌梁素海典型地物在 MODIS 图像中的光谱特征曲线

Fig.2 Reflectance spectra of typical surface in MODIS image of Lake Ulansuhai

个属的藻类. 这些丝状绿藻属于固着藻类, 其表面附生有丝状蓝藻、硅藻等. 丝状绿藻首先附着在沉水植物、底泥表面生长, 达到一定生物量后, 形成团块, 随光合作用产生的气泡飘浮至水面, 团块表层受强光照部分死亡而呈黄色, 被称为“黄苔”^[3]. 大面积的“黄苔”使得乌梁素海的水鸟赖以生存的食物被覆盖和污染, 对在此栖息生存的水禽构成严重危害, 也造成水体严重污染, 渔业资源遭到破坏. 国家卫星气象中心和内蒙古自治区气象局及时到当地进行实地考察, 并利用卫星遥感数据对乌梁素海“黄苔”灾情进行了动态监测和分析.

1 监测方法

2008年7月15日 MODIS 图像中水体、芦苇、陆地(近似于裸土)和“黄苔”在可见光到近红外的光谱特征曲线见图2, 其中通道1, 2, 3, 4 分别表示可见光蓝光、绿光、红光通道和近红外通道(分别对应 MODIS 的3、4、1和2通道^[4]). 陆地的光谱曲线特征是在可见光到近红外波段, 反射率都是随着波长的增加而增加, 而且其反射率在可见光部分明显大于“黄苔”、芦苇和水体, 在近红外波段小于芦苇反射率(图2). 芦苇具有典型的绿色植物的光谱曲线特征, 即在蓝光波段以及红光波段叶绿素强烈吸收反射峰往长波方向移动^[6].

辐射能而呈吸收谷, 在这个吸收谷之间即绿光波段吸收相对减少, 形成一个小的反射峰. 在近红外波段, 由于叶子的细胞壁和细胞空隙间折射率不同, 导致多重反射引起高反射率^[5], 反射率高于陆地和“黄苔”. 水体因对入射能量具有强吸收性, 所以总体上呈现较弱的反射率, 并具有随着波长的增加而进一步减弱的趋势, 其中水体在蓝光范围内的反射率相对较强, 并具有明显的散射作用, 绿光次之, 红光相对较弱, 水体在近红外具有强吸收特点, 这一波长范围内几乎无反射率. 随着水体浑浊度的增加, 水体的反射率会有所变化, 通常会使得光谱曲线的内蒙古自治区气象局根据 EOS/MODIS 图像中乌梁素海湖区水体出现异常光谱现象的水面位置, 进行实地考察, 考察位置见图1中所标注的数字. 结合实地考察拍摄的照片资料, 对 MODIS 图像上的“黄苔”反射率进行分析, 可以发现“黄苔”的反射光谱特征趋势与陆地很相似, 在可见光到近红外波段, 它们的反射率都是随着波长的增加而增加, 但各个波段都明显低于陆地的反射率. 在蓝光和绿光波段与芦苇的反射率值接近, 由于“黄苔”呈黄色, 相对于芦苇, “黄苔”在红光的反射率偏高, 在近红外波段低于芦苇的反射率. 另外, “黄苔”在各个波段的反射率都高于清水体的反射率.

依据地物的光谱特点, 利用不同波段的运算得到的遥感指数可以突出地物的信息, 本文根据波段运算原理提出了监测“黄苔”的遥感指数方法. 遥感指数中比值型运算指数很多, 比值指数创建的基本原理就是在多光谱波段内, 找出所要研究地物的最强反射波段和最弱反射波段, 将强者置于分子, 弱者置于分母. 通过比值运算, 进一步扩大二者的差距, 使感兴趣的地物在所生成的指数影像上得到最大的亮度增强, 而其他背景地物则受到普遍的抑制, 从而达到突出感兴趣地物的目的. 比值型指数通常又会被作归一化处理, 使

依据地物的光谱特点, 利用不同波段的运算得到的遥感指数可以突出地物的信息, 本文根据波段运算原理提出了监测“黄苔”的遥感指数方法. 遥感指数中比值型运算指数很多, 比值指数创建的基本原理就是在多光谱波段内, 找出所要研究地物的最强反射波段和最弱反射波段, 将强者置于分子, 弱者置于分母. 通过比值运算, 进一步扩大二者的差距, 使感兴趣的地物在所生成的指数影像上得到最大的亮度增强, 而其他背景地物则受到普遍的抑制, 从而达到突出感兴趣地物的目的. 比值型指数通常又会被作归一化处理, 使

其数值范围统一到-1至1之间. 本文根据“黄苔”的光谱特点,即在红光波段反射率的关系(“黄苔”>芦苇>水体)提出归一化差异遥感指数 I_{RB} ,其表达式如下:

$$I_{RB} = \frac{R_{Red} - R_{Blue}}{R_{Red} + R_{Blue}} \quad (1)$$

式中, R_{Red} 代表红光波段的反射率; R_{Blue} 代表蓝光波段的反射率. 在 MODIS 影像中,分别对应于 1,3 波段. 如前所述,由于“黄苔”的反射在红光波段强于水体和芦苇,在蓝光波段这些物体的反射率差异较小,因此用红光波段和蓝光波段的反差构成的 I_{RB} 可以避免采用近红外波段而造成芦苇与严重程度“黄苔”混淆误判的问题,突出影像中的“黄苔”信息.

研究表明,在做动态变化监测中,大气校正是必不可少的关键步骤^[7]. 因此对“黄苔”进行动态监测分析,首先要消除大气对遥感图像的影响. 传感器在空中获取地表信息过程中,受到大气分子、气溶胶、水汽等大气成份的吸收与散射的影响,结果使部分和目标地物无关的大气散射辐射进入传感器视场,从而改变了目标地物反射辐射能量. 为了消除由于这种大气影响引起的遥感图像质量退化的处理过程,被称为遥感图像的大气校正. 大气校正通常是个非常复杂的过程^[8],本文提出了一种相对的大气校正方法,选择晴空下纯水体反射率为基准反射率,假设研究区上空大气的影像是均一的. 通常在可见光波段大气的影像是都会使得地物反射率升高,因此通过减去升高部分的反射率(这里主要是指程辐射)可以达到在一定程度上去除大气影响的作用,表达式为:

$$R_s(\lambda) = R^*(\lambda) - R_p(\lambda) \quad (2)$$

式中, $R_s(\lambda)$ 表示去除程辐射影响的地物反射率, $R^*(\lambda)$ 表示表观反射率, $R_p(\lambda)$ 表示程辐射影响增加的反射率. 因此,去除大气程辐射影响 I_{RB} 可表示为:

$$I_{RB}(a) = \frac{(R_{Red} - R_{PRed}) - (R_{Blue} - R_{PBlue})}{(R_{Red} - R_{PRed}) + (R_{Blue} - R_{PBlue})} \quad (3)$$

式中, R_{PRed} 表示红光波段由于程辐射影响增加的反射率, R_{PBlue} 表示蓝光波段由于程辐射影响增加的反射率. 选择乌梁素海中部的一块明水体作为纯水体区,确定其水体在晴空下蓝光波段的反射率为 0.065,红光波段的反射率为 0.04. 每幅图像都以此为基准,去除蓝光和红光波段由于大气影响而产生的程辐射的影响. 去除此影响后,计算的 $I_{RB}(a)$ 消除了大气的影,使得动态监测更加准确.

根据 7 月 15 日图像中所标注的异常高反射率地点(图 1),于 7 月 17 日进行了实地考察,结果表明,在 7 月 15 日图像中标注的各点均有不同程度的“黄苔”,且“黄苔”的严重程度与该处图像红光波段反射率异常增高的幅度有关,参考实地拍摄的照片资料(图 3),在图像上选择了一些典型样点,并得到了各样点光谱曲线图(图 4). 不同严重程度的“黄苔”在蓝光和绿光波段差异比较小,而在红光和近红外波段的光谱曲线是有明显差异的,随着“黄苔”严重程度的增强反射率明显升高,红光与蓝光和绿光的差异增大. 结合 $I_{RB}(a)$ 值变化情况,对“黄苔”信息进行分级,把“黄苔”分为严重、较重和较轻“黄苔”3种, $I_{RB}(a)$ 取值分别对应为:当 $I_{RB}(a) \geq 0.1$ 为严重“黄苔”, $0 \leq I_{RB}(a) < 0.1$ 为较重“黄苔”, $-0.1 \leq I_{RB}(a) < 0$, $I_{RB}(a) > 0$ 为较轻“黄苔”.



图 3 乌梁素海严重、较重和较轻“黄苔”的暴发照片

Fig. 3 Photos of different grades “Huang Tai” algae in Lake Ulansuhai

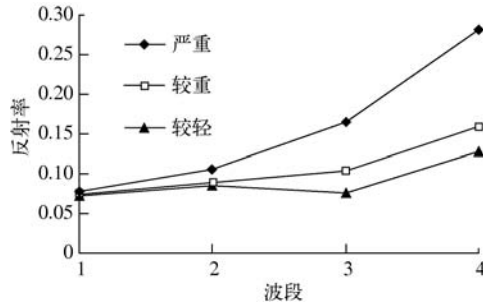


图4 乌梁素海不同严重程度“黄苔”在 MODIS 图像中的光谱特征曲线
Fig. 4 Reflectance spectra of different grades “Huang Tai” algae in MODIS image of Lake Ulansuhai

2 结果分析

论文得到了6月12日的中巴资源卫星CBERS-02B/CCD传感器数据,其空间分辨率为19.5m,该数据在可见光到近红外范围包括蓝、绿、红和近红外4个波段和一个全色波段^[9].对CCD数据进行几何校正和辐射校正,通过分析乌梁素海地区典型地物在蓝、绿、红和近红外4个波段的光谱特征,发现其趋势与MODIS数据比较一致,因此采用公式(3)计算遥感指数,同时参考根据CCD数据342波段合成的彩色图像人工识别结果提取“黄苔”信息.提取的结果与利用6月10日的MODIS图像提取的“黄苔”信息进行对比分析(图5,图6),250m空间分辨率的MODIS数据和19.5m空间分辨率的CCD数据提取的“黄苔”分布信息具有90%以上的一致性,这说明MODIS数据可以比较准确的反映“黄苔”信息.

论文利用5-10月初的EOS/MODIS数据对乌梁素海“黄苔”信息进行处理,获得5月中旬至10月初部分时次图像的“黄苔”监测等级示意图(图7).

论文对5-10月初乌梁素海“黄苔”面积进行了统计(图8),结果表明,乌梁素海在5月初之前,未发现“黄苔”信息,5月中旬湖区内开始出现“黄苔”,面积约30km²;6月上旬,“黄苔”面积有所增大,到了下旬,“黄苔”面积明显增大,达到约63km²,严重程度“黄苔”的面积也明显扩大,达7.3km²;7月上旬,“黄苔”面积达到最大值,约71km²,占明水体面积的59%,严重程度“黄苔”的面积达12km²,进入中下旬,乌梁素海继续维持大范围的“黄苔”.8月份以后,“黄苔”面积逐渐减小,到10月初,“黄苔”信息已经基本消失.

乌梁素海“黄苔”的暴发主要是湖泊富营养化和气候条件共同作用的结果^[3].“黄苔”属于绿藻,绿藻对氮的需求较高,其中氨态氮对绿藻的生长有明显的促进作用.乌梁素海是河套灌区排灌水系的重要组成部分,是农田退水和工业、生活废水的唯一承泄渠道,来水氮、磷含量较高^[10],长期富营养化形成营养丰富的底泥,使沉水植物大面积繁殖,为丝状绿藻提供了固着载体.乌梁素海严重沼泽化致使水体经常处于缺氧状态,进而使底泥中氨氮的产生量加剧.乌梁素海湖区5-7月氨氮范围在0.04-0.6mg/L,适宜丝状绿藻大量繁殖.

降水和气温对湖泊藻类的暴发具有一定的影响^[11].2007年冬季,乌梁素海地区遭遇了三十年一遇的“寒冬”,冰冻深度较往年深10cm以上,导致开河时间比往年晚20-25d.低地温使乌梁素海传统优势种水草发芽慢、生长慢.3月份,乌梁素海地区气温迅速升高,3-4月份平均气温比历年高3-4℃;3-5月份乌梁素海平均降水比历年少15.5mm,减少68.6%,同时4、5月份乌梁素海日照时间分别比历年同期长224和90h,增高的水温为“黄苔”的暴发提供了条件;6-7月份,由于气温偏高加快了湖水蒸发,加之连续干旱少雨,湖水水量得不到补充,致使湖泊中的富营养物质浓度增高,进一步为藻类的繁殖蔓延提供了必要条件,使得“黄苔”面积达到最大.7月13-14日,乌拉特前旗普降中雨,局部大雨,气象部门在乌梁素海上空开展了人工增雨作业,使乌梁素海的水量得到补充,从而有效降低了湖水的富营养化程度和温度,但7月中旬到下旬,该地区基本上没有降雨天气出现,气象条件对改善“黄苔”现状不利.7月底8月初,内蒙古巴彦淖尔市调拨专用资金,组织专人和设备清理“黄苔”,防止“黄苔”蔓延对乌梁素海的生态环境造成更大危害,大大减少了“黄苔”的面积.随着温度的降低,“黄苔”逐渐消亡.进入10月份,在遥感图像上已经没有“黄苔”信息.

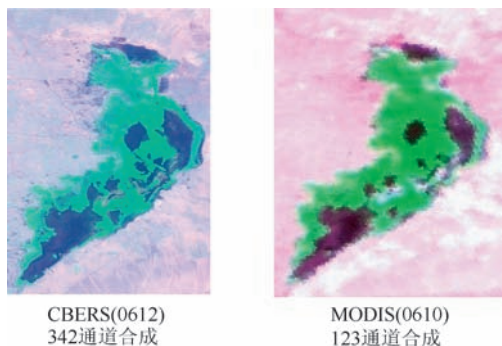


图5 CBERS/CCD 和 MODIS 彩色合成图对比
Fig.5 Comparison of MODIS and CBERS/CCD color images

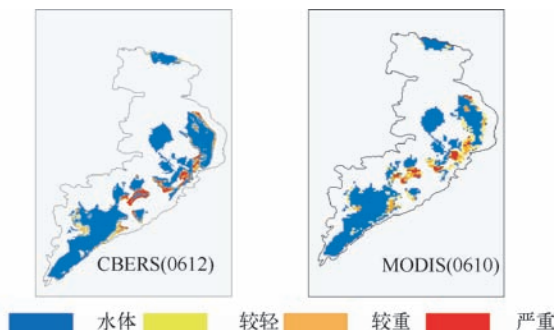


图6 CBERS/CCD 和 MODIS 数据提取的“黄苔”专题图对比
Fig.6 Comparison of “Huang Tai” algae maps of CBERS/CCD and MODIS

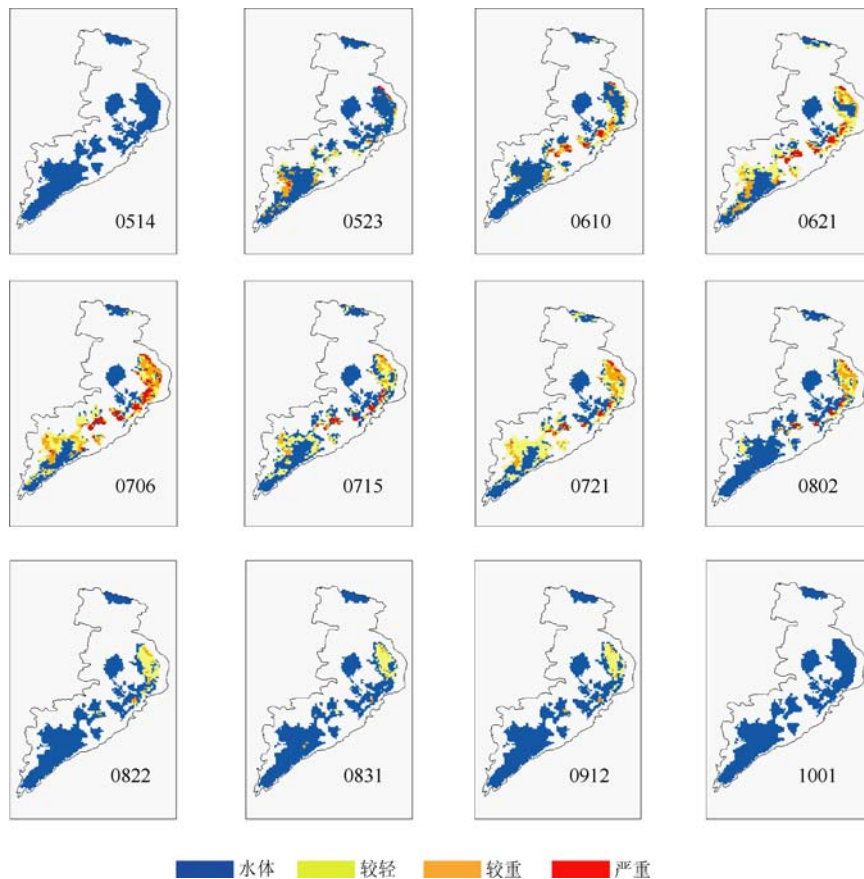


图7 乌梁素海“黄苔”动态监测图
Fig.7 Monitoring maps of “Huang Tai” algae of Lake Ulansuhai

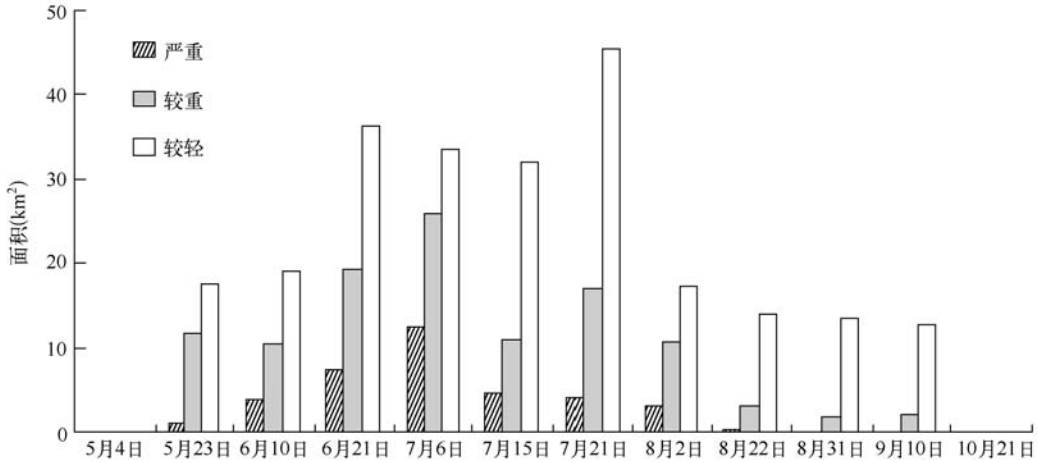


图8 乌梁素海“黄苔”面积变化动态监测

Fig. 8 Changing of “Huang Tai” algae area of Lake Ulansuhai

3 小结

本文通过分析“黄苔”、芦苇、陆地和水体等地物在 EOS/MODIS 图像上的光谱特征,提出遥感指数方法来提取“黄苔”信息.结合乌梁素海“黄苔”实地考察资料和中巴资源卫星 CBERS/CCD 数据对 MODIS 数据监测“黄苔”的结果进行了比对验证.本文提出的方法可以对湖泊“黄苔”进行有效的监测.利用 2008 年 5-10 月的 MODIS 数据对乌梁素海的“黄苔”灾情进行了监测,获得了乌梁素海“黄苔”灾情发生发展特征信息,乌梁素海在 2008 年 5 月初开始出现“黄苔”,6-7 月份发生大面积“黄苔”暴发,进入 8 月以后“黄苔”开始逐渐消退,10 月份基本消失,这为乌梁素海“黄苔”的治理提供了重要的数据信息支持.

4 参考文献

- [1] 于瑞宏,刘廷玺,许有鹏等.人类活动对乌梁素海湿地环境演变的影响分析.湖泊科学,2007,19(4):465-472.
- [2] 李畅游,武国正,李卫平等.乌梁素海浮游植物调查与营养状况评价.农业环境科学学报,2007,26:283-287.
- [3] 陈明,李巍.内蒙古自治区乌梁素海“黄苔”事件处置的启示.今日国土,2009,5:28-31.
- [4] 刘玉洁,杨忠东.MODIS 遥感信息处理原理与算法.北京:科学出版社,2001.
- [5] 赵英时.遥感应用分析原理与方法.北京:科学出版社,2003.
- [6] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数 MNDWI 提取水体信息的研究.遥感学报,2005,9(5):589-596.
- [7] Kaufman Y. The atmospheric effect on separability of field classes measured from satellite. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 18: 21-34.
- [8] 郑伟,曾志远.遥感图像大气校正方法综述.遥感信息,2004,6:66-70.
- [9] 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.
- [10] 李兴,李畅游,李卫平等.内蒙古乌梁素海不同形态氮的时空分布.湖泊科学,2009,21(6):885-890.
- [11] 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.