



# 基于 MODIS 数据的洞庭湖水面面积估算方法

龚 伟 杨 大 文 钱 群

(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

**摘要:**利用美国 Terra 卫星上 MODIS 传感器提供的 NDVI 数据产品,采用两种方法分别在年和月时间尺度上对 2000~2007 年间洞庭湖的水面面积进行了估算。在年尺度上,采用 ISODATA 方法对 NDVI 时间序列进行非监督分类,区分水面及各种湿地类型,并分析了各类湿地的面积变化趋势。在月尺度上,采用 16 d 平均 NDVI 数据,通过 NDVI 阈值提取水面,在不同的季节选取不同的阈值,并将基于 NDVI 数据得到的水面面积与基于水位—面积曲线得到的水面面积进行了对比分析。在此基础上,探讨了两类不同尺度上分类方法的优点、缺点及适用范围。

**关 键 词:**水面变化; MODIS; NDVI; 非监督分类; 洞庭湖

**中图分类号:** X171.1

**文献标识码:** A

洞庭湖是我国第 2 大淡水湖,按 1995 年测绘的地图量算,对应于城陵矶(七里山)水文站水位 33.5 m(吴淞高程,下同)时的湖面面积为 2 625 km<sup>2</sup>。由于湖心淤积,洪水向四周延伸扩展,加上“四水”尾闾洪道水面的 1 300 km<sup>2</sup>,洞庭湖水面面积达 3 900 km<sup>2</sup>,其中东洞庭湖为 1 313 km<sup>2</sup>,南洞庭湖为 905 km<sup>2</sup>,目平湖为 332 km<sup>2</sup>,七里湖为 75 km<sup>2</sup>。洞庭湖对长江中下游的水资源、防洪、水生态与环境安全有着至关重要的作用。因此,洞庭湖湿地的演变尤其是水面面积变化一直受到高度重视。本文基于卫星遥感影像,针对不同的时间尺度,采用不同的方法,识别水体、湿地,以及估算水面面积,并与传统的水位—面积曲线法得到的结果进行对比分析,探讨年、月两个不同尺度分类方法的优点、缺点及适用范围,分析洞庭湖水面与不同类型的湿地范围演变规律,为进一步研究洞庭湖的长期演变规律以及防洪、水资源利用、水环境与生态保护等提供基础和依据。

## 1 数据来源

本文使用的卫星遥感数据为美国 Terra 卫星的中分辨率成像光谱仪(MODIS)传感器提供的归一化植被指数(NDVI)数据。Terra(EOS-AM1)是美国地球观测系统(EOS)的先进极地轨道环境遥感卫星,于 1999 年 12 月 18 日发射,可提供 2000 年以后的数据。该卫星通过洞庭湖的时间为当地时间 10:30 和 22:30。其中 MODIS 是 EOS-AM1 系列卫星的主要探测器之一,它是新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有 36 个光谱通道,分布在 0.4~14 μm 的电磁波谱范围内,地面分辨率分别为 250、500 m 以及 1 000 m。多波段数据可以同时提供反映陆地、云边界、云特征、海洋水色、浮游植物、生物地理、化学、大气中的水汽、地表

温度、云顶温度、大气温度、臭氧、云顶高度等特征信息。<sup>[1]</sup>

植被指数是一种通过多波段数据组合来识别地表土壤、植被、水体的综合指标。植被在红光波段(0.60~0.70 μm)有一个强烈的吸收带,它与叶绿素密度成反比,植物的反射光谱曲线因叶绿素对这部分光的强烈吸收而呈波谷形态;而在近红外波段(0.75~1.3 μm)有一个较高的反射峰,它与植物叶绿素密度成正比。因此,这两个波段的组合与植被的叶绿素含量、叶面积和生物量密切相关。归一化植被指数(NDVI)又称标准化植被指数,定义为近红外波段 NIR(0.7~1.1 μm)与可见光红外波段 RED(0.4~0.7 μm)反射率之差和这两个波段反射率之和的比值<sup>[1]</sup>,即:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

式中  $\rho_{NIR}$  是近红外波段反射率;  $\rho_{RED}$  是红外波段反射率。

本文采用了美国 NASA 网站上提供的 Terra MODIS 16 d 合成的植被指数产品 MOD13Q1,该数据的空间分辨率为 250 m。MOD13Q1 产品选择为 16 d 中无云数据的合成,合成过程中优先选择近星下点无云的像元,并尽可能减小云、阴影、大气中气溶胶的影响,并应用二向反射率(BRDF)模型对观测角度进行了订正<sup>[2]</sup>。研究区域范围为北纬 28.5°~29.5°、东经 111.75°~113.25°,时间范围是 2000 年 2 月至 2007 年 12 月。

在数据处理过程中,首先采用 MODIS 投影变换软件(MRT 工具)进行拼接和投影变换,参考坐标系选用 WGS 84 椭球体和 UTM 投影,重采样后的分辨率分别为 250 m。尽管 16 d 合成后 NDVI 数据质量相对于每天数据有了较大提高,但是受云和阴影以及辐射校正精度的影响,下载的 NDVI 数据仍会出现色调不

收稿日期:2009-05-12

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(200801008);国家“十一五”科技支撑计划(2006BAB05B04-3(1))

作者简介:龚 伟,男,清华大学水利水电工程系水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,博士研究生。

一致的情况,影像上常出现各种暗影、黑斑、白斑。为保证成果质量,参考了 MODIS 陆地工作组(MODLAND ST)提供的 数据质量评估结果<sup>[3]</sup>,如果研究区域内超过 20% 的像元质量不佳,则不采用这幅影像。2000~2007 年共有 180 幅影像,剔除质量不佳的 34 幅之后,还剩 146 幅质量较佳的影像用于本文的分析。

## 2 年尺度的水面识别

根据从农田遥感观测<sup>[4]</sup>总结的经验,在年尺度上,以全年所有遥感影像合成的 NDVI 时间序列为研究对象,以不同土地覆被的全年 NDVI 变化过程为依据进行分类。农田植被遵循严格的物候学规律,例如小麦往往都在每年的同一个时间拔节、抽穗、灌浆,其具体时间受水分和温度等条件的影响,但各年之间差别不大。所以对于同一种农作物,每年的 NDVI 变化过程都是几乎一致的。不同种类的生物遵循不同的物候学规律,例如小麦和玉米的成熟时间是不一样的。将全年的 NDVI 遥感影像合并,对 NDVI 时间序列进行分析,可以发现小麦和玉米的 NDVI 全年最大值出现在不同的时间,根据 NDVI 高峰值出现的季节就可以区分小麦田和玉米田。

由于缺乏不同季节下当地植被、水体与 NDVI 对应关系的详细实测资料,本文选择了非监督分类方法。非监督分类方法主要有两种:ISODATA 法和 K-Means 法。K-Means 法的聚类准则是通过迭代,逐次移动各类的中心,使得每一聚类中多模式点到该类别的中心的距离的平方和最小。该算法存在的主要问题是:受所选聚类中心的数目、初始位置、模式分布的几何性质和读入次序等因素影响,并且在迭代过程中没有有效的调整方法,因此由不同的初始分类中心可能得到不同的结果。解决这一问题的办法是:选择不同的聚类中心数目,采用试探性方法寻找初始中心,以提高分类的准确性。

ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques Algorithm) 算法也称为迭代自组织数据分析算法。它与 K-Means 算法有两点不同:① 它不需要每调整 1 个样本的类别就重新计算 1 次各类样本的均值,而是在每次把所有样本都调整完毕之后才重新计算 1 次各类样本的均值,前者称为逐个样本修正法,后者称为成批样本修正法;② ISODATA 算法不仅可以通过调整样本所属类别完成样本的聚类分析,而且可以自动地进行类别的“合并”和“分裂”,从而得到分类数比较合理的聚类结果<sup>[5]</sup>。

使用遥感影像处理软件 ENVI 对影像进行非监督分类。研究发现,ISODATA 方法比 K-Means 方法得到的分类结果更为稳定。采用相同的参数,ISODATA 算法给出的分类结果十分接近,而 K-Means 方法给出的结果随机性较大,因此,本文选用了 ISODATA 方法进行分类。

分类步骤如下:首先尝试在包括湖区的较大范围裁出一矩形区域,对其整体做非监督分类。虽然得到的结果可以大致确认湖泊和湿地的范围,但是常常会将城区(主要是岳阳城区)与某一种类的湿地相混淆。研究过程中,曾考虑用 1km 分辨率的土地利用数据做掩膜,将除了湖泊湿地以外的土地利用类型排除在研究范围之外,然而这种方法对土地利用图的精度要求较高。通过将土地利用数据与实地测绘地图相对比<sup>[6]</sup>,发现湖区很多湿地都被误分为农田或草地。因此,本文对 2000~2007 年间的 NDVI 时相变化进行了分析,只要有一个时相的 NDVI 小于 0,则认为该地区曾经被水完全淹没,将所有这些像元提取出来作为掩模(即分类范围)<sup>[5]</sup>,得到的掩膜范围与实地测绘地图符

合程度较高<sup>[6]</sup>,在应用中也取得了较好的效果。首先将研究区域初步分为 7 个类别,通过与湖区湿地分带的对应关系,归并为 5 个类别,对每个类别计算了 NDVI 平均值和标准差。

洞庭湖属浅水湖泊,按照广义的湿地定义,整个洞庭湖都属于湿地范畴<sup>[7]</sup>。洞庭湖附近区属于静水生境,可分为若干带:沿岸阳光能穿透到底,常常生长有根植物,包括沉水植物、浮水植物、挺水植物等,并逐渐过渡为陆生群落<sup>[8]</sup>。根据洞庭湖的水文特性,可将这里的湿地分为两大类型:即浅水水体湿地类型和过水洲滩湿地,其中过水洲滩湿地以洪水期被淹没、枯水季节出露为特征,按植被可分为防护林滩地、芦苇滩地、草滩地、泥沙滩地<sup>[7]</sup>,在空间分布上,泥沙滩地邻近湖水,往外依次为草、芦苇、防护林滩地。按照各个类别的植被指数变化特点,并结合其分布关系,得到如下 5 个类别(见图 1)。

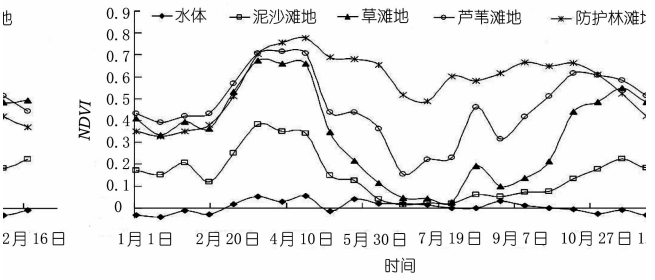


图 1 洞庭湖湿地 NDVI 多年平均值

类别 1。浅水水体湿地,指常年有水、无植被(即不存在露出水面的挺水植物)区域,一般位于湖心区,在最内层,NDVI 值全年在 0 左右(如图 1 所示)。

类别 2~5。过水洲滩湿地,为季节性过水,其 NDVI 值在冬季较低,春季三四月间较高,汛期较低,汛后又回升至汛前的水平,该类典型的 NDVI 曲线遂呈 M 形(见图 1)。根据 NDVI 值由小到大以及 NDVI 值下降程度划分,分别对应为泥沙滩地、草滩地、芦苇滩地和防护林滩地。

图 2 为各个类别 8 a 平均 NDVI 时相变化图,从中可以看出各个类别特征明显,说明本文所采用的分类方法有较好的区分度。

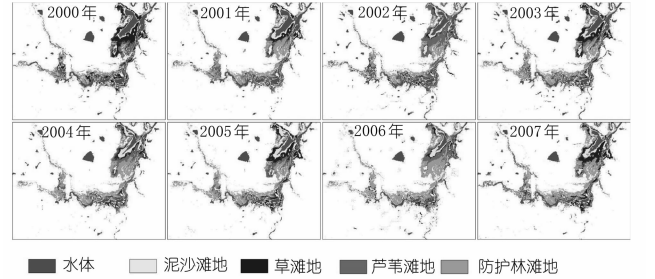


图 2 2000~2007 年洞庭湖水面及湿地非监督分类结果汇总

图 2 所示为分类结果,表 1 给出了各类湿地的面积统计结果,图 3 给出了各类别面积年际变化与年降水总量变化的关系,图 3 中的降水数据源自中国气象科学数据共享网<sup>[9]</sup>,降水资料使用的是《中国地面气候资料日值数据集》,标准值使用的是《中国地面气候标准值月值数据集(1961~1990 年)》。使用距离方向加权平均法<sup>[10]</sup>插值到 1 km 的网格上,再分别计算长江上游和洞庭湖水系的面平均雨量。

表 1 洞庭湖水面及各类湿地面积统计 km<sup>2</sup>

| 年份   | 水面     | 泥沙滩地   | 草滩地    | 芦苇滩地   | 防护林滩地  | 总面积     |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 2000 | 835.88 | 342.00 | 646.19 | 387.19 | 313.63 | 2524.88 |
| 2001 | 702.50 | 282.06 | 282.88 | 469.25 | 602.06 | 2338.75 |
| 2002 | 650.06 | 404.63 | 401.00 | 673.44 | 496.13 | 2625.25 |
| 2003 | 768.13 | 346.25 | 454.06 | 427.63 | 557.63 | 2553.69 |
| 2004 | 508.06 | 379.25 | 350.44 | 493.63 | 691.25 | 2422.63 |
| 2005 | 577.50 | 412.69 | 482.44 | 423.13 | 577.25 | 2473.00 |
| 2006 | 446.06 | 439.94 | 250.31 | 396.94 | 858.50 | 2391.75 |
| 2007 | 560.88 | 364.19 | 499.19 | 461.56 | 640.50 | 2526.31 |

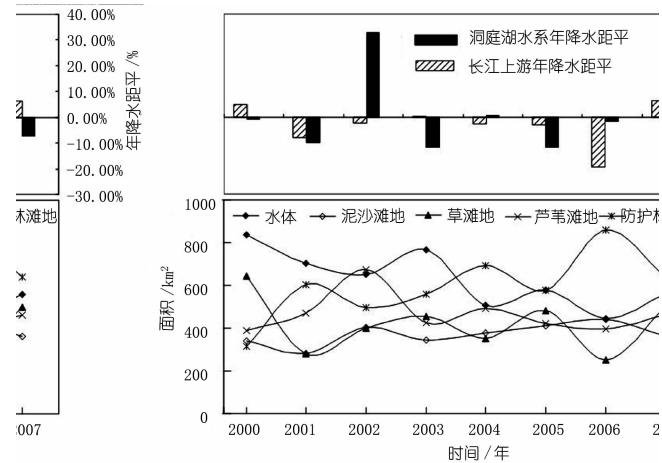


图 3 洞庭湖湿地面积变化与年降雨量的关系

从表 1 和图 3 中可以看到湖区浅水水体湿地面积呈减小趋势,从 2000~2007 年共减少了 275 km<sup>2</sup>,年均减少 43.87 km<sup>2</sup>;防护林滩地,也就是受淹时间最短的类别,增长最快,共增长了 326.88 km<sup>2</sup>,年均增加 46.99 km<sup>2</sup>。运用差异探测分析<sup>[5]</sup>,得到 2000~2007 年的各类别面积变化情况,以百分比变化量表示(见表 2,表中数据的含义为:例第 2 行第 1 列的 22.64 表示从 2000~2007 年有 22.64% 的水体转化为泥沙滩地)。

表 2 洞庭湖 2000 年与 2007 年湿地面积差异分析 %

| 变更项目  | 水体     | 泥沙滩地  | 草滩地    | 芦苇滩地  | 防护林滩地  |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 水体    | 62.05  | 1.74  | 0.11   | 0.05  | 0.08   |
| 泥沙滩地  | 22.64  | 36.55 | 3.24   | 0.84  | 0.06   |
| 草滩地   | 2.10   | 28.80 | 57.08  | 3.54  | 0.10   |
| 芦苇滩地  | 0.93   | 19.99 | 22.61  | 28.78 | 17.28  |
| 防护林滩地 | 0.04   | 3.40  | 16.65  | 63.97 | 78.28  |
| 未分类   | 12.24  | 9.52  | 0.32   | 2.83  | 4.21   |
| 面积增减  | -32.90 | 6.49  | -22.75 | 19.21 | 104.23 |

从表 2 中可看到:2007 年与 2000 年相比,水体以及草滩地面积都有明显减少,分别减少 32.9% 以及 22.75%;泥沙滩地略有增加但不明显,只有 6.49%,芦苇滩地则增加了 19.21%;防护林滩地增加最为明显,比例达到 104.23%。不同类别之间的转化关系为:22.64% 的水体转化为泥沙滩地,分别有 28.8% 和 19.99% 的泥沙滩地转化为草滩地和芦苇滩地;分别有 22.61% 和 16.65% 的草滩地转化为芦苇滩地和防护林滩地;63.97% 的芦苇滩地转化为了防护林滩地;同时也有 17.28% 的防护林滩地转化为芦苇滩地。这些转化关系表现出以下特点:从淹没时

间长的湿地类型转化为过水时间更短的湿地类型,其中芦苇滩地的变化最大。由此,可以得出如下初步结论:洞庭湖的核心区(即水体部分)面积呈逐年缩小趋势,过水洲滩湿地部分平均过水时间缩短。

3 月尺度的水面识别

在月尺度上,对每一时相的 MODIS 影像逐一分析,根据光谱特征识别水面。MODIS 的 36 个光谱通道中,分辨率达到 250 m 的只有 4 个,分别是蓝光、红光、近红外和中红外波段。其中红光波段和近红外波段区分水体、陆地、植被的效果最好,蓝光和中红外则用处不大。其他波段分辨率为 500 m 或 1 000 m,因为分辨率较低,用于统计水面和湿地面积的误差较大,故没有采用。本文采用由红光和近红外波段合成的 NDVI 数据,通过选用恰当的阈值来区分水体、湿地植被和陆地。为了排除城区的干扰,采用了在年尺度上得到的掩膜范围。

NDVI 阈值的选取对水面识别成果的质量影响很大。谭衢霖<sup>[11]</sup>以鄱阳湖为研究对象,通过人机交互确认,推荐 NDVI 在 -0.1~0.3 之间都有可能是水面。这一成果目前被广泛引用<sup>[12~13]</sup>。彭定志等采用类似的思路,研究洞庭湖面积变化对洪水水位的影响<sup>[14~15]</sup>。但是,由于以上研究成果都是在 Terra 和 Aqua 卫星升空后几年之内完成的,MODIS 的观测序列还不够长,对观测数据的质量评估体系也不成熟,推荐的 NDVI 分类阈值有调整的必要性。本文基于长系列的 MODIS 观测数据和较为成熟的数据质量评估体系,重新确定了 NDVI 阈值。在实地考察和反复的分类尝试中认识到,对于洞庭湖这样植被丰富、水位波动剧烈的湖泊,由于植被物候规律与湖泊水文规律的相互影响,这一阈值在不同的季节应该取不同的值。在综合考察洞庭湖水文、生态、气候等条件之后,结合年尺度水面识别的成果(图 1),提出了如下方案:在冬季,植被稀少,湖泊水位很低,一般无植被裸土的 NDVI 在 0~0.3,而水体的 NDVI 在 0 以下,所以冬季水体的 NDVI 阈值应取为 0,NDVI>0 的为裸土,NDVI<0 的为水面。在夏季,水热条件良好,湿地植物生长旺盛,如果植被下方无水体,NDVI 应在 0.8 以上。但由于这一时期也是汛期,湖泊水位较高,一些水面上方有植被覆盖,这些地区的 NDVI 值较低,约在 0.4 左右,这类地区的 NDVI 在年内呈春秋高、冬夏低的“M”型。所以夏季的 NDVI 阈值应该取为 0.5 左右,NDVI>0.5 的地区为有植被陆地,0<NDVI<0.5 的地区为有植被水体,NDVI<0 的为无植被水体。春季的情况较为复杂,一方面,高程较低的洲滩刚有植被生长就已经被淹没,与裸土相比其 NDVI 值更低;另一方面,高程较高的洲滩上植被刚刚开始生长,其 NDVI 值较裸土高,经过比较和尝试,本文选定 NDVI 的阈值为 0.1,NDVI>0.1 为陆地,0<NDVI<0.1 为有植被水体,NDVI<0 的为无植被水体。

根据上述研究方法,对洞庭湖湿地逐月水面及湿地变化进行了解译。得到洞庭湖湿地面积变化过程。此外,为了评估上述方法的可信度,本文还与水位—面积曲线法做了对比。根据 1995 年的实测水位—面积曲线,水位采用城陵矶(七里山)水文站的实测水位数据,将由遥感数据得到的水面面积与由实测水位经水位面积曲线推算得到的水面面积进行对比发现,两者的相关系数为 0.81(图 4),说明本文提出的水面识别准则具有较高的可信度。

经分析遥感观测得到的水面面积普遍比水文观测值偏大,这显然不是随机误差引起的。为了探究其原因,利用遥感观测

得到的湖面面积反推水位—面积曲线,并与 1995 年实地测绘得到的水位—面积曲线对比,结果如图 5 所示。

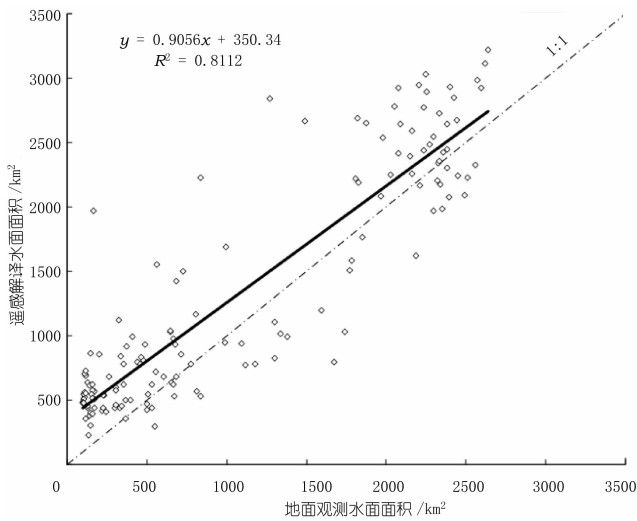


图 4 洞庭湖湿地水面面积的遥感观测与水文观测结果对比

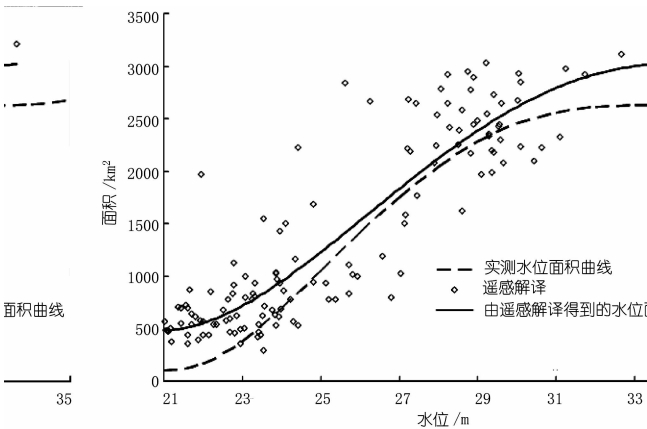


图 5 由两种方法得到的洞庭湖水位面积曲线对比

从图 5 可以看到,在同样水位下,遥感观测得到的水面面积确实更大一些。但是当时 MODIS 的观测时间不够长,数据质量评价体系尚不成熟。本文采用长系列的观测数据,结合较为成熟的数据质量评价体系,得到的结果显示:在同一水位下,基于遥感观测的水面面积要大于 1995 年水位—面积曲线计算出的面积。这与彭定志等<sup>[14]</sup>指出的“退田还湖”后洞庭湖水面面积曲线改变,相同水位下湖面面积增大,调蓄容量增加的结论是一致的。1998 年大洪水后的“退田还湖”政策扩大了洞庭湖的容积,应该是 2000~2007 年间遥感观测的水面面积大于同一水位下由 1995 年水位—面积曲线推算面积的原因。

4 讨论

本文使用两种不同的方法,年尺度上的识别和估算,侧重于湿地植被状况的年际变化以不同年份间的对比为主,着重讨论湿地植被的演变趋势;月尺度上的识别和估算则侧重于对时效性的把握,着眼于洪水淹没范围的准确和实时监测。两者的适用条件是不同的,前者相当于对湿地植被状况的野外调查与分析,后者相当于对湖区淹没范围的水文观测与分析。

在年尺度上使用非监督方法对 NDVI 时间序列进行分类,

虽然能够解释洞庭湖水面及周边湿地的年际变化,但也存在一些问题。这一方法本身适用于分析物候规律明显的地区,但对于洞庭湖而言,由于物候和水文的相互作用,使上述方法的应用受到局限。其原因主要有以下两点:

(1) 同一种农作物,每年的 NDVI 变化过程都是几乎一致的,但是对同一种湿地植物,其 NDVI 变化不但受到本身物候的控制,还受到湖泊水位的影响。例如对湖滩草洲湿地,每年春季和秋季植被生长旺盛,NDVI 很高,夏季水位上涨,NDVI 降低。但是每年夏季水位上涨的时间不同,程度也不一样,这使得分类标准每年都不一样。

(2) 对洞庭湖这样的天然湖泊湿地而言,导致 NDVI 升高的原因只有一种,就是植被茂盛、长势良好。但导致 NDVI 降低的原因却可以归结为截然相反的两种:① 水量丰沛,湖泊水位上涨淹没了洲滩植被;② 水量很少,湖泊水位下降,湿地植被由于供水不足而枯萎死亡。单纯从 NDVI 的变化难以区分这两种原因,必须结合水文与气象资料分析。

过水洲滩湿地的全年 NDVI 序列呈 M 型,与一般农作物和天然植被明显不同。一般农作物与天然植被的 NDVI 值往往在夏季水热条件最好时达到一年中的最大值,全年 NDVI 序列呈单峰型。就过水洲滩湿地而言,由于汛期被水淹没,其 NDVI 值反而低于春季和秋季,全年 NDVI 序列呈 M 型,春秋高,夏季低。所以,如果某一地区的来水丰沛,其夏季 NDVI 却比春秋两季都低,基本可以确定该地在夏季被水淹没。物候和水文的相互作用导致过水洲滩湿地的 NDVI 序列呈特有的 M 型曲线。

在月尺度上采用 NDVI 阈值法,可以与水文上常用的水位—面积曲线法联合使用。这种方法具有两大优点:① 可以分辨具体的淹没范围,在大洪水造成堤垸决口时可以帮助确定受灾范围,而且方法简便快捷,不需要很多计算;② 在冬季枯水期由于水面比降变大,水位—面积曲线会产生较大误差,一般而言会低估水面面积,相比而言 NDVI 阈值法不受影响,更加可信。此外,因为只需要单幅 NDVI 影像,理论上这种方法可以做到每天上午和下午卫星过境时各观测 1 次,相当于日尺度观测。但是这种方法也有缺点,主要是 NDVI 阈值的确定对结果影响很大,需要理论分析与实地踏勘相结合,视具体情况而定。本文综合了年尺度 NDVI 序列非监督分类结果来确定 NDVI 阈值。

5 结论

本文使用了两种方法分别在年尺度和月尺度上对洞庭湖水面面积进行识别和估算。在年尺度上,使用 ISODATA 算法对 2000~2007 年洞庭湖湿地的 NDVI 序列进行非监督分类,归并之后可以分为 5 个类别:浅水水体湿地、泥沙滩地、草滩地、芦苇滩地和防护林滩地。对分类结果进行差异探测分析,发现各湿地类型都有转化为过水时间更短的类型趋势,说明洞庭湖水面面积逐年减小。在月尺度上,使用 NDVI 阈值法分类,结合年尺度的分类成果,在不同的季节选取不同的 NDVI 阈值,其结果与 1995 年实测水位—面积曲线推算的水面面积对比,相关系数为 0.81。NDVI 阈值法识别的水体面积普遍比根据 1995 年实测水位—面积曲线推算的水面面积偏大,在同一水位下,基于遥感观测的水面面积要大于 1995 年水位—面积曲线计算出的面积,其原因可以认为是 1998 年大洪水后的“退田还湖”政策扩大了洞庭湖的水面面积和容积。

参考文献:

[1] 刘玉洁,杨忠东等. MODIS 遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学

出版社, 2001.

[2] Huete, A. , Justice, C. , and van Leeuwen, W. 1999. MODIS vegetation index (MOD13) , Algorithm Theoretical Basis Document (AT-BD). [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod13.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf)

[3] Roy, D. P. , Borak, J. S. , Devadiga, S. , Wolfe, R. E. , Zheng, M. , Descloitres, J. The MODIS land product quality assessment approach. Remote Sensing Of Environment, 2002, (3) , 62 – 76.

[4] Yi, Y. H. , Yang, D. W. , Chen, D. Y. , Huang, J. F. Retrieving crop physiological parameters and assessing water deficiency using MODIS data during the winter wheat growing period. Canadian Journal Of Remote Sensing, 2007, (33) :189 – 202.

[5] 李小娟等. ENVI 遥感影像处理教程. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

[6] 水利部长江水利委员会. 长江防洪地图集. 北京: 科学出版社, 2001.

[7] 柳易林. 洞庭湖湿地生态系统生态服务功能价值评估与生态功能区划. 湖南: 湖南师范大学, 2005.

[8] 崔保山, 杨志峰. 湿地学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006.

[9] 中国气象科学数据共享网. <http://cdc.cma.gov.cn/>.

[10] 杨大文, 楠田哲也. 水资源综合评价模型及其在黄河流域的应用. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

[11] 谭衢霖. 鄱阳湖湿地生态环境遥感变化监测研究. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2002.

[12] 丁莉东, 吴昊, 王长健等. MODIS 图像湖泊水体信息的快速识别与制图. 海洋测绘, 2006, (6) :31 – 34.

[13] 顾中宇. 鄱阳湖水文特征分析及水体形态特征的遥感提取. 南昌: 江西师范大学, 2007.

[14] 彭定志, 徐高洪, 胡彩虹等. 基于 MODIS 的洞庭湖面积变化对洪水位的影响. 人民长江, 2004, (4) :14 – 16.

[15] 彭定志, 郭生练, 黄玉芳等. 基于 MODIS 和 GIS 的洪灾监测评估系统. 武汉大学学报(工学版), 2004, (4) :7 – 10.

(编辑: 徐诗银)