

## 基于时间序列 MODIS 影像的鄱阳湖丰水期悬浮泥沙浓度反演及变化\*

邬国锋<sup>1</sup>, 崔丽娟<sup>2\*\*</sup>, 纪伟涛<sup>3</sup>

(1: 武汉大学资源与环境科学学院, 教育部地理信息系统重点实验室, 武汉 430079)

(2: 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

(3: 鄱阳湖国家级自然保护区管理局, 南昌 330038)

**摘要:** 悬浮泥沙浓度是描述水质的重要参数之一, 获得其在空间和时间上的分布信息对于理解、管理和保护湖泊生态系统是必要的. 此研究旨在建立基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)影像的鄱阳湖悬浮泥沙浓度反演模型, 并利用建立的模型反演 2000–2007 年鄱阳湖丰水期的悬浮泥沙浓度, 分析其在时间和空间上的变化特征并对引起这些变化的原因进行讨论. 研究结果揭示: MODIS Terra 影像红波段与悬浮泥沙浓度具有显著的相关性( $R^2=0.92$ ,  $s.e.=12.02\text{mg/L}$ ,  $F=154.30$ ,  $P<0.001$ ), 可以用于鄱阳湖丰水期悬浮泥沙浓度的反演; 自 2000–2007 年间, 鄱阳湖悬浮泥沙浓度呈明显的时间和空间分布特征, 在南部水体悬浮泥沙浓度无明显变化, 在北部呈增加趋势, 而中部水体泥沙浓度波动较大; 鄱阳湖北部的采砂活动是导致此区域悬浮泥沙浓度增加的主要原因, 其与长江江水倒灌鄱阳湖共同作用引起鄱阳湖中部泥沙浓度的波动, 抚河、信江和饶河输沙量的非显著变化也导致南部鄱阳湖水体悬浮泥沙浓度的非显著变化.

**关键词:** 鄱阳湖; MODIS; 悬浮泥沙浓度; 反演; 变化分析

## Time-series MODIS images-based retrieval and change analysis of suspended sediment concentration during flood period in Lake Poyang

WU Guofeng<sup>1</sup>, CUI Lijuan<sup>2</sup> & JI Weitao<sup>3</sup>

(1: *School of Resource and Environmental Science & Key Laboratory of Geographic Information System of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, P.R.China*)

(2: *Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry & Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, P.R.China*)

(3: *Bureau of Jiangxi Lake Poyang National Nature Reserve, Nanchang 330008, P.R.China*)

**Abstract:** Suspended sediment concentration (SSC) is one of important indicators for describing water quality, and obtaining its spatial and temporal distribution information is necessary for understanding, managing and protecting lake ecosystems. This study aimed to developed the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) image-based SSC retrieval model for Lake Poyang, used the model to predict the SSC of Lake Poyang during the flood period from 2000 to 2007, analyzed its spatial and temporal change characteristics and further discussed the causes to induce these changes. The results revealed that: the red band of MODIS Terra was significantly related to the SSC ( $R^2=0.92$ ,  $s.e.=12.02\text{mg/L}$ ,  $F=154.30$ ,  $P<0.001$ ), and it may be applied to retrieve the SSC of Lake Poyang during the flood period. The SSC of Lake Poyang showed clear spatial and temporal distribution characteristics from 2000 to 2007, while the SSC had no clear change in the south, increased in the north and fluctuated largely in the centre of the lake. The dredging activities in the northern Lake Poyang was the main cause inducing the increased SSC in this region, and mixed with water backflow from the Yangtze River to Lake Poyang which resulted in the fluctuation of SSC in the centre. Non-significant change

\* 国家林业局“948”项目, 湿地自然保护区环境监测分析技术引进项目(2004-4-34)资助. 2008-05-30收稿; 2008-09-14收修改稿. 邬国锋, 男, 副教授; E-mail: guofengwu@gmail.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: lkyclj@126.com.

of sediments from Rivers Fuhe, Xinjiang and Raohe caused the non-significant change of SSC in the south lake.

**Keywords:** Lake Poyang; MODIS; suspended sediment concentration; retrieval; change analysis

湖泊在经济、旅游、娱乐以及生物多样性保护等方面承担着多种非常重要的功能<sup>[1]</sup>, 这些功能实施的成败在很大程度上受水质的影响. 因此, 水质监测和保护对保持湖泊功能的可持续性是必不可少的. 悬浮泥沙浓度是描述水质的重要参数之一<sup>[2-4]</sup>, 高悬浮泥沙浓度对水体的生态环境带来一定的影响, 例如传输养分和污染物<sup>[5-6]</sup>和削弱光在水体内的传播<sup>[7-8]</sup>. 其中, 光的削弱将影响水生植物的生长<sup>[9-10]</sup>, 进而影响整个湖泊生态系统<sup>[11]</sup>. 因此, 获得悬浮泥沙浓度在空间和时间上的分布信息对于理解、管理和保护湖泊生态系统是必要的.

遥感技术已经广泛地用于悬浮泥沙浓度的估计. 例如, Nellis 等<sup>[12]</sup>以及 Keiner 和 Yan<sup>[13]</sup>分别利用 Landsat TM 影像反演美国 Tuttle Creek 水库和 Delaware 湾的悬浮泥沙浓度, Tyler 等<sup>[14]</sup>借助 TM 影像估计欧洲 Balaton 湖的悬浮泥沙浓度. 然而, 由于悬浮泥沙浓度在一些区域具有快速变化的特点, 同时鉴于重复周期(16d)的限制, TM 影像对于这样的动态变化监测并不非常适合. 另外, 在世界的很多区域, 频繁的云层覆盖减少实际可用的影像数目, 这将进一步限制 TM 影像在动态监测悬浮泥沙浓度领域的应用<sup>[15]</sup>. Islam 等<sup>[16]</sup>和 Ruhl 等<sup>[17]</sup>使用改进型甚高分辨率扫描辐射仪(AVHRR)影像分别在孟加拉国的 Ganges 和 Brahmaputra 河流以及美国的 San Francisco 湾预测水体的悬浮泥沙浓度. 尽管 AVHRR 影像具有非常高的时间分辨率(每天超过 4 次), 但其低的空间分辨率(1.1km)限制了它在面积较小水域的应用. 中分辨率成像光谱仪(MODIS), 因其中等的空间分辨率(红和红外波段为 250m)、日重复周期、高度的敏感性以及免费下载等优点<sup>[18-19]</sup>, 在动态监测悬浮泥沙浓度方面具有非常大的应用潜力. 国内外很多的研究人员已经在不同地区对这样的潜力进行了尝试, 例如, Hu 等<sup>[3]</sup>、Miller 和 McKee<sup>[18]</sup>、Sipelgas 等<sup>[20]</sup>、Li 等<sup>[21]</sup>以及 Yan 和 Tang<sup>[22]</sup>等分别在美国、芬兰、非洲、中国和印度利用 MODIS 影像进行悬浮泥沙浓度的反演, 还有学者基于 MODIS 影像在长江南京段、福建近岸海域、黄海及东海海域和长江口反演悬浮泥沙浓度<sup>[23-26]</sup>.

鄱阳湖是当前中国第一大淡水湖, 也是水质最好的湖泊之一. 近年来, 随着鄱阳湖流域经济的快速发展, 鄱阳湖水体的污染情况日趋严重. 据江西省水环境监测部门监测, 2002 年鄱阳湖水质Ⅲ类水以上的比例占 99.7%, 而 2006 年下降到 82.1%, 基本上呈逐年下降趋势. 鄱阳湖的水质和污染问题一直受到多方的高度关注, 保护鄱阳湖这一湖清水是当前鄱阳湖管理和保护工作的重点之一. 基于野外水样采集-实验室分析这样传统方法——悬浮泥沙浓度监测已经在鄱阳湖水域或其流域不同程度地展开, 但这样的监测方法很难反映悬浮泥沙浓度在空间上的连续变化情况. 同时, 遥感技术在鄱阳湖水域悬浮泥沙浓度监测方面的应用研究还处于探索阶段. 因此, 基于鄱阳湖当前的情况以及目前监测手段的局限性, 此研究旨在建立基于 MODIS 影像的鄱阳湖悬浮泥沙浓度反演模型, 并用建立的模型反演 2000-2007 年鄱阳湖丰水期的悬浮泥沙浓度, 分析泥沙浓度在时间和空间上的变化特征并对引起浓度变化的原因进行分析.

## 1 数据

### 1.1 研究区域

鄱阳湖(东经 115°50'-116°44', 北纬 28°25'-29°45')位于江西省北部、长江中下游南岸, 其承赣江、抚河、信江、饶河以及修河等江河来水, 经调蓄后由湖口注入长江, 是一个过水性、吞吐型、季节性的湖泊, 具有“高水是湖、低水似河”独特的自然地理景观, 枯水期面积 1290km<sup>2</sup>, 平水期面积 2797km<sup>2</sup>, 丰水期面积 3900km<sup>2</sup>, 其湿地面积占江西省湿地总面积的 97.2%. 鄱阳湖是长江流域最大的天然洪水调蓄区、长江中下游的重要水源地、我国最大的淡水鱼产区 and 鱼类种质资源库、世界著名的候鸟越冬栖息地<sup>[27]</sup>, 也是中国第一批列入“国际最重要湿地名录”的湿地之一, 其社会、经济和生态地位极其重要.

### 1.2 水样采集及悬浮泥沙浓度的实验室分析

利用覆盖鄱阳湖 2005 年 10 月 31 日的 Landsat TM 影像目视分析鄱阳湖水体悬浮泥沙浓度的空间分布特征, 然后根据分析的结果进行水样采样样线和 42 个样点的设计(图 1). 在 2007 年 9 月 27 日根据设计的采样方案进行水样的收集. 在野外水样收集时, 通过全球定位系统(GPS)使采样船只定位到预先设计

的采样点, 然后借助水样采集器在 0.3–0.5m 水深处进行水样的采集. 水样采集之后, 在 24h 之内运回实验室, 并根据悬浮泥沙实验室分析标准进行每个水样的悬浮泥沙浓度的计算. 另外, 武汉大学陈晓玲教授提供了 2005 年 7 月 3–4 日的鄱阳湖悬浮泥沙采样分析结果, 9 个样点的分布如图 1 所示, 信息包括采样点的经纬度和悬浮泥沙浓度, 用此独立数据对建立的模型进行检验.

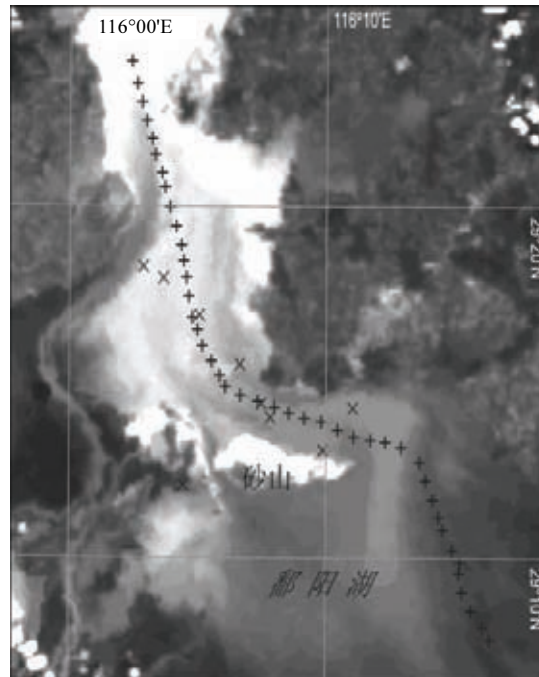


图 1 MODIS Terra 影像(获取时间: 2007 年 9 月 27 日)红波段影像显示用于建立(+)和评价(x)悬浮泥沙浓度反演模型的水样采样点

Fig.1 Red band of MODIS Terra image (captured on 27th September, 2007) showing the sampling sites for developing (+) and validating (x) suspended sediment concentration retrieval model

### 1.3 MODIS 影像

为了反演和分析鄱阳湖丰水期悬浮泥沙浓度, 借助 NASA 的 Earth Observing System Data Gateway(<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>)下载了覆盖鄱阳湖地区 2000–2007 年 7–9 月的 MODIS Terra 地面反射率产品, 除 2007 年 8 月无质量好的影像之外, 其它月份各一景. 此产品包含了经过大气校正的 250m 和 500m MODIS 红、红外、蓝和绿波段的地面反射率(关于此产品的详细信息请参照: <http://modis-sr.ltdri.org>). 对下载的影像作如下预处理: 首先把所有影像的投影方式转换为 WGS84/UTM 投影; 然后裁剪出只包括鄱阳湖的矩形范围内的影像; 其次, 对空间分辨率为 500m 的 3、4 波段(蓝、绿)进行空间重采样, 使其与 1、2 波段(红、红外)的空间分辨率(250m)一致, 然后合并 1–4 波段形成一个影像文件, 以便后续的处理; 最后, 进行影像的非监督分类以及目视判读, 确定水域, 制作掩膜层, 并利用掩膜层进行图像的掩膜操作, 提取水域.

## 2 方法

### 2.1 悬浮泥沙浓度反演

首先, 借助 Statistica 6.0 软件, 利用 2007 年 9 月 27 日的 MODIS Terra 影像和同一天野外采集的悬浮泥沙浓度数据进行了如下模型的测试, 以发现最适合的反演模型:

(1)悬浮泥沙浓度或其自然对数变换值与波段或波段自然对数变换值的单变量线性和非线性模型: 包

括 Linear(线性)、Logarithmic(对数)、Inverse(倒数)、Quadratic(二次)、Cubic(三次)、Power(幂)、Compound(复合)、S-curve(S-曲线)、Growth(增长)和 Exponential(指数)模型;

(2)悬浮泥沙浓度或其自然对数变换值与任意两波段或两波段自然对数变换比值的单变量线性和非线性模型, 使用的模型与上同.

然后, 利用发现的最适合模型和 2005 年 7 月 5 日的 MODIS 影像反演当日的鄱阳湖悬浮泥沙浓度, 并与 2005 年 7 月 3-4 日的鄱阳湖悬浮泥沙采样分析结果进行比较分析, 评价模型的精度. 最后, 利用最适合的反演模型对鄱阳湖 2000-2007 年 7-9 月的悬浮泥沙浓度进行预测.

### 2.2 悬浮泥沙浓度分析

利用定义的位于鄱阳湖北部、中部和南部的 3 个采样区域(图 2), 针对从每景 MODIS 影像反演的悬浮泥沙浓度, 分别计算这些区域内的平均悬浮泥沙浓度, 用以代表 2000-2007 年 7-9 月鄱阳湖丰水期的悬浮泥沙分布情况; 分析不同时期悬浮泥沙浓度在鄱阳湖北部、中部和南部的空间分布格局, 进而分析 2000-2007 年悬浮泥沙浓度在鄱阳湖不同区域的动态变化情况, 并分析引起产生这种空间和时间变化的潜在原因.

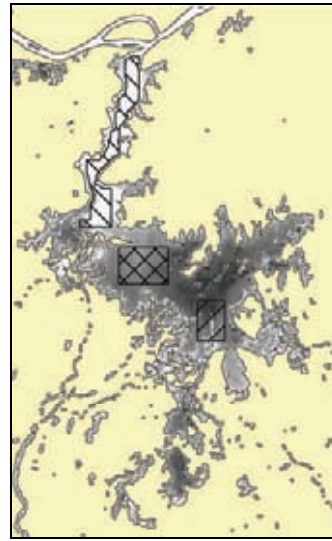


图 2 用于估算鄱阳湖北部、中部和南部平均悬浮泥沙浓度的采样区域(黑色网格区域)

Fig.2 Sampling regions (identified by black grids) used for estimating average suspended sediment concentrations in the northern, central and southern Lake Poyang

### 3 结果及讨论

表 1 列举了利用 2007 年 9 月 27 日野外采集的悬浮泥沙浓度数据和同日 MODIS Terra 250m 影像的红、红外波段、两波段比及泥沙指数之间的最适合同回归模型, 发现 MODIS Terra 的 250m 红波段的三次模型能够最好地解释鄱阳湖水体的悬浮泥沙浓度(SSC). 利用 2005 年 7 月 3-4 日的野外采集悬浮泥沙浓度数据和 2005 年 7 月 5 日的 MODIS Terra 影像对模型的检验, 结果显示野外实测值与模型反演值之间的相关系数为 0.94,  $P < 0.01$ , 表明它们之间具有强相关性, 误差标准差为 17.34mg/L, 尽管采样时间和影像反

表 1 悬浮泥沙浓度分别与 MODIS Terra 影像 250m 的红(R)、红外(IR)波段、两波段比(IR/R)及泥沙指数( $SI=(R-IR)/(R+IR)$ )之间的最适合同回归模型

Tab.1 The best fitting regression models between suspended sediment concentration (SSC) and reflectance of 250m red band (R), infrared band (IR), band ratio (IR/R) and sediment index ( $SI=(R-IR)/(R+IR)$ ) of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) Terra

反演模型	$R^2$	s.e.	F
$SSC = -15.67 + 1005.29R - 15858.70R^2 + 86236.23R^3$	0.92	12.02	154.30
$SSC = 1.58 - 221.83IR + 39137.48IR^2 - 217651.00IR^3$	0.89	13.67	116.42
$SSC = 11.87 - 251.98(IR/R) + 1054.74(IR/R)^2$	0.78	19.87	72.16
$SSC = 635.56 - 2170.77SI + 2416.64SI^2 - 872.89SI^3$	0.77	20.08	47.16

\* s.e.表示误差标准差, 样本数目为 42,  $P < 0.001$ .

演鄱阳湖悬浮泥沙浓度,但仍旧不能保证其在不同季节的普遍适应性.原因有二:一是不同季节的获取时间有 1-2d 的间隔,模型还是获得了比较理想的结果(图 3).此经验模型在高水位季节比较理想地水体组分不同,从而对应的经验模型也存在差别;二是不同季节的大气环境不同,尽管 MODIS 地面反射率产品经过严格的大气校正,但其是从全球的角度进行考虑,针对一个特定的小区域难免存在误差.大气校正一直是内陆水色定量遥感中最重要的、也是最困难的环节,目前还没有成熟的针对内陆水体的大气校正方法存在,探索可行的内陆水体大气校正方法将有助于模型精度的提高.

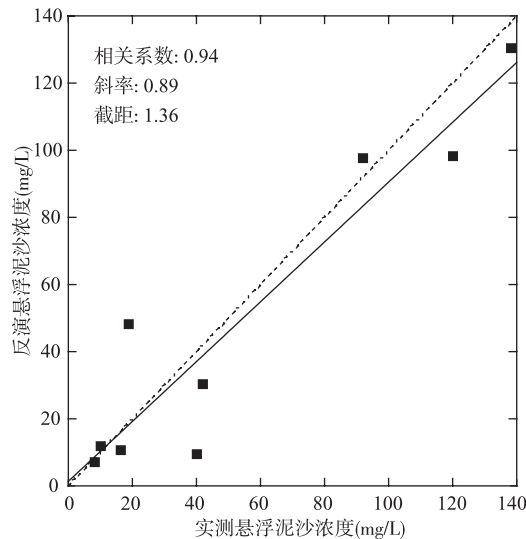


图 3 实测与反演悬浮泥沙浓度的对比散点图

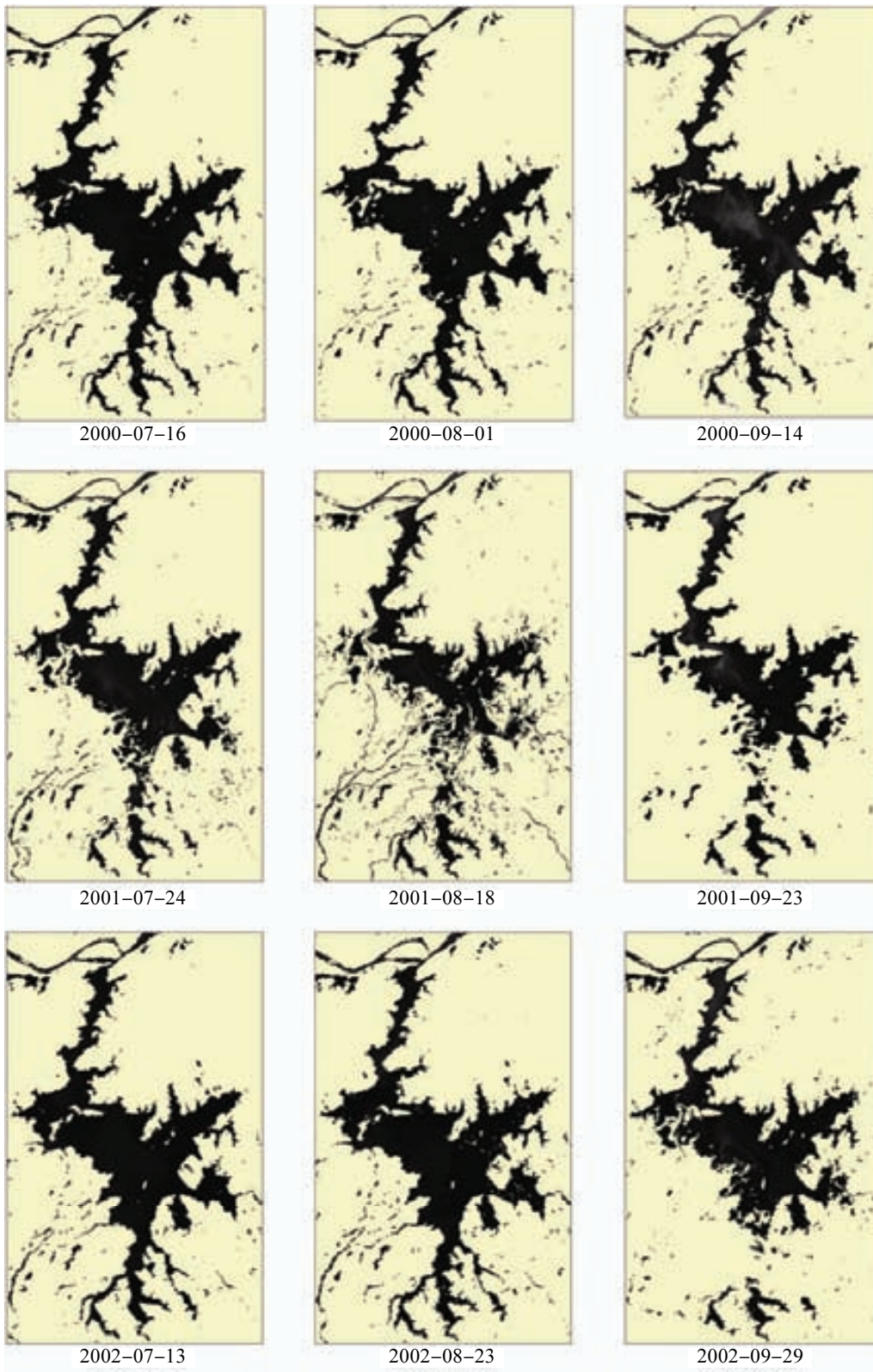
Fig.3 Scatter plot of measured vs. retrieved suspended sediment concentration

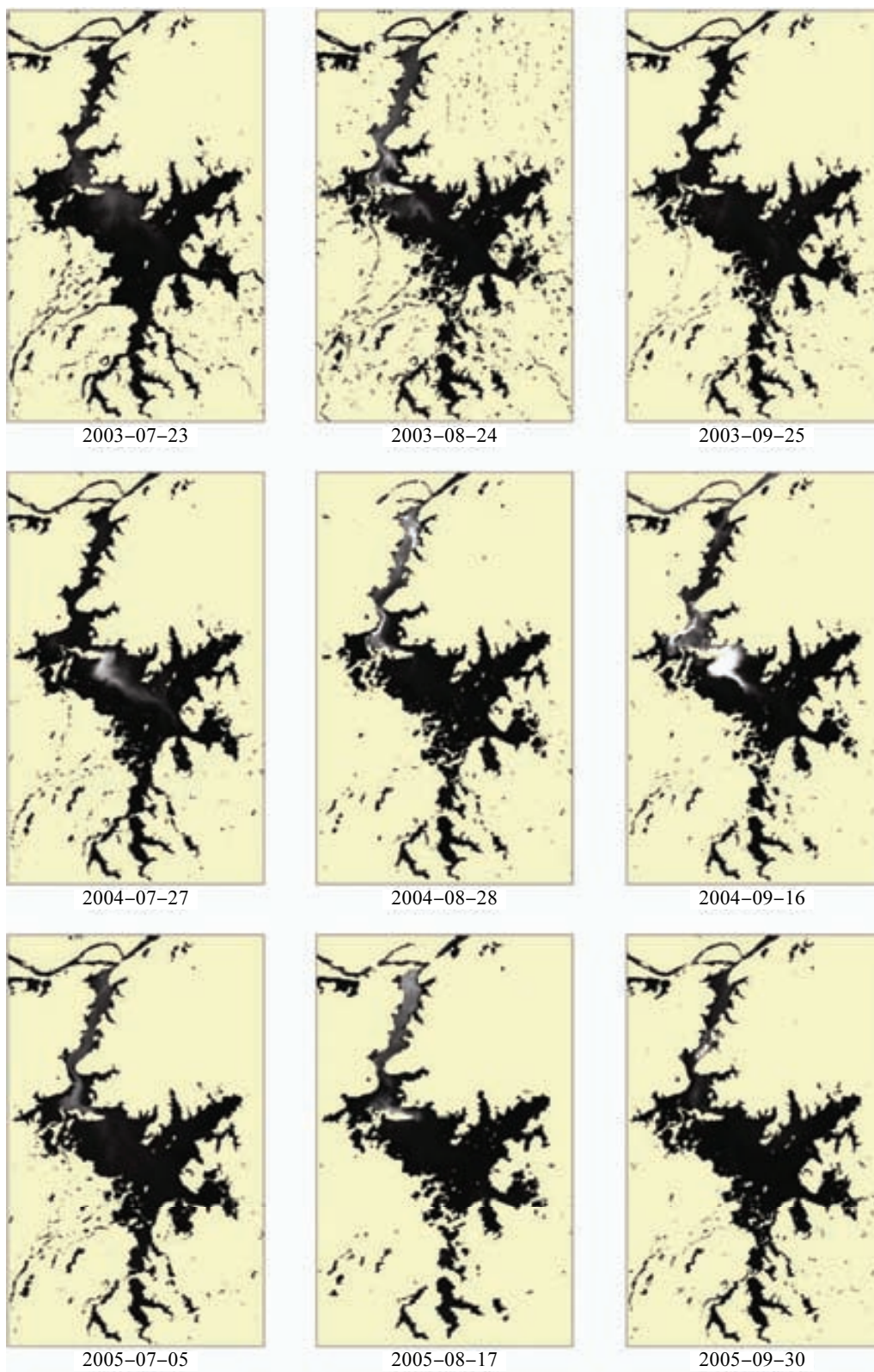
利用建立的模型,分别对鄱阳湖 2000-2007 年 7-9 月的悬浮泥沙浓度进行反演,图 4 描述了这期间悬浮泥沙浓度在时间和空间上的分布和变化情况.

图 5 显示了从图 4 计算得到的鄱阳湖北部、中部和南部采样区域 2000-2007 年 7-9 月平均悬浮泥沙浓度在时间和空间上的变化情况.从年度空间变化的角度,从 2000-2002 年悬浮泥沙浓度在鄱阳湖的北部、中部和南部变化较小,位于 0-40mg/L 之间,而大部分时间介于 0-20mg/L 之间;而从 2003-2007 年,这样的空间分布差别增大,在鄱阳湖南部泥沙浓度位于 0-10mg/L 之间,而在北部大于 20mg/L,有的时间甚至高达 180mg/L.从随时间变化的角度,在鄱阳湖的南部 2000-2007 年之间泥沙浓度基本保持一致,无明显的变化;而在鄱阳湖的北部呈增加的趋势,从 2000-2002 年的 0-20mg/L 到 2003-2007 年的大约 30-190mg/L 左右;在鄱阳湖的中部,大部分时间与鄱阳湖南部的泥沙浓度比较一致,而在一些特定时间具有明显的增加趋势,如 2004、2006 和 2007 年.

近年来由于长江经济带建设的快速发展,建筑砂石需求量大增,同时长江中下游干流河道全线禁采江砂以及采砂所带来的可观的经济利益等原因驱动,鄱阳湖北部的采砂业自 2001 年以来迅速兴起<sup>[28]</sup>.采砂活动引起沉积泥沙的再悬浮,增加悬浮泥沙浓度,进而引起采砂区水体透明度的下降. Wu 等<sup>[29]</sup>研究发现 2000-2005 年鄱阳湖砂山至湖口区域夏秋季水体平均透明度随着船只数目的增加而显著下降.但这种相关性并不意味着采砂活动与水体透明度下降之间的因果关系,因为降雨、风以及其它因素同样也可以降低水体透明度.然而,通过对船只最终目的地以及船只分布与水体透明度变化的一致性等方面的分析,可以确认采砂是引起此区域水体透明度下降的主要原因<sup>[29]</sup>.鄱阳湖的水体透明度和悬浮泥沙浓度具有显著的负相关性<sup>[30]</sup>,因此可以推断鄱阳湖北部区域的采砂活动引起此区域的悬浮泥沙浓度的增加.









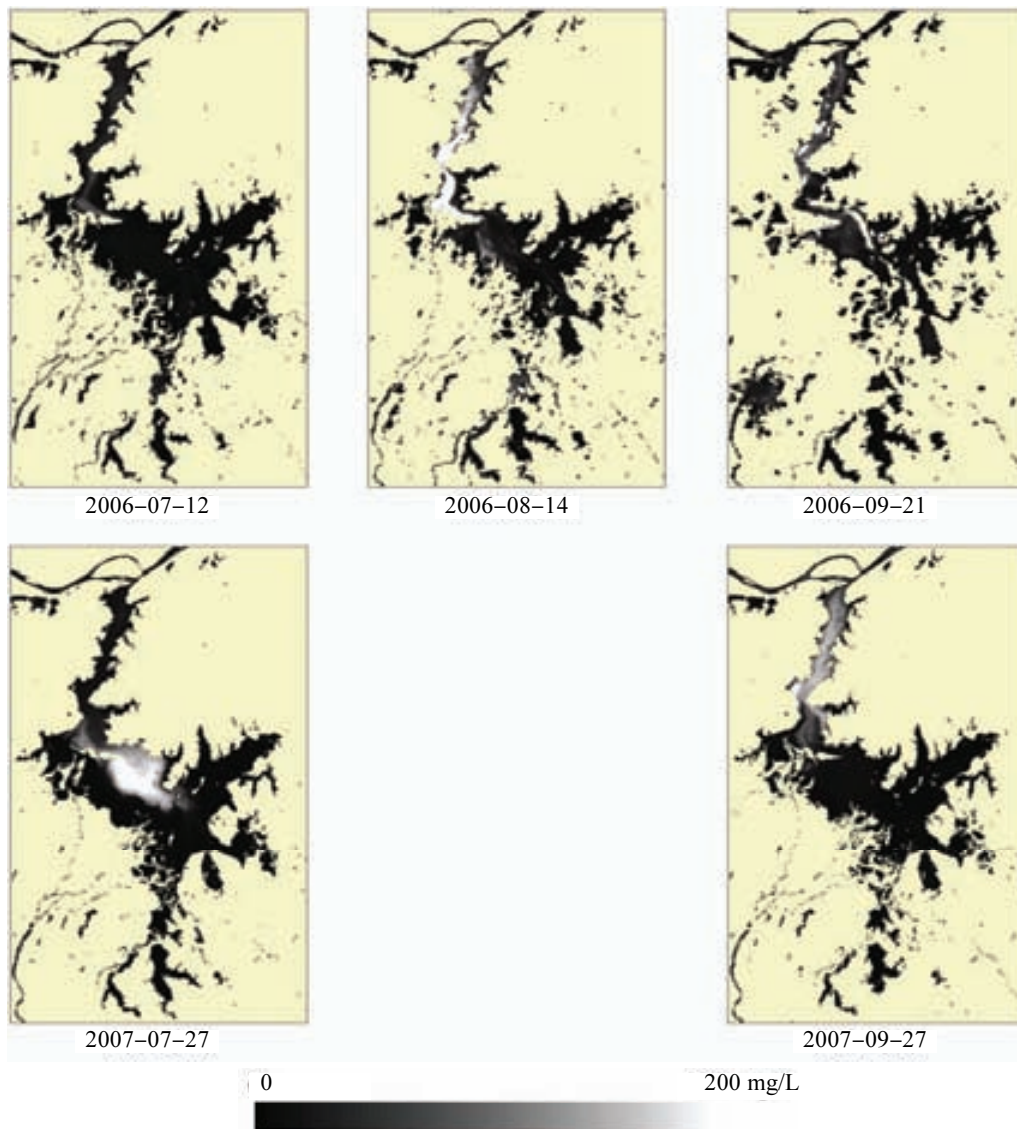


图4 基于 MODIS 的 2000–2007 年 7–9 月份鄱阳湖悬浮泥沙浓度

Fig.4 MODIS-based suspended sediment concentration from June to September, 2000–2007 in Lake Poyang

由于长江和鄱阳湖流域主汛期不同, 在每年 7–9 月, 长江江水倒灌鄱阳湖现象时有发生<sup>[31]</sup>. 据 1954–1998 年的统计数据, 这 45 年中有 37 年发生江水倒灌<sup>[32]</sup>. 据 1956–2000 年统计数据显示每年平均倒灌 2.5 次, 平均持续 14d. 自 2001 年以来, 鄱阳湖北部区域的采砂活动引起悬浮泥沙浓度的增加, 如果这期间倒灌发生, 长江水将推动鄱阳湖北部的浑浊水体向南移动, 到达鄱阳湖的中部, 增加这些影响区域的悬浮泥沙浓度, 当倒灌停止之后, 影响并没有停止, 因为受影响区域的悬浮泥沙浓度需要一段时间恢复. 在 2004、2006 和 2007 年个别时期鄱阳湖中部悬浮泥沙浓度显著增加, 这些时期与长江江水倒灌鄱阳湖的期间基本一致, 如在 2004 年发生 2 次倒灌, 分为位于 7 月 22–27 日和 9 月 10–15 日. 因此可以推断长江江水倒灌鄱阳湖以及因鄱阳湖北部采砂活动引起的悬浮泥沙浓度的增加共同作用导致鄱阳湖中部悬浮泥沙浓度大的波动.



鄱阳湖南部的悬浮泥沙浓度主要受抚河、信江和饶河输沙量的影响. 据 2000–2006 年《长江泥沙公报》, 在这期间此 3 条河流的输沙量无明显变化趋势. 因此, 鄱阳湖南部的悬浮泥沙浓度呈无明显的变化.

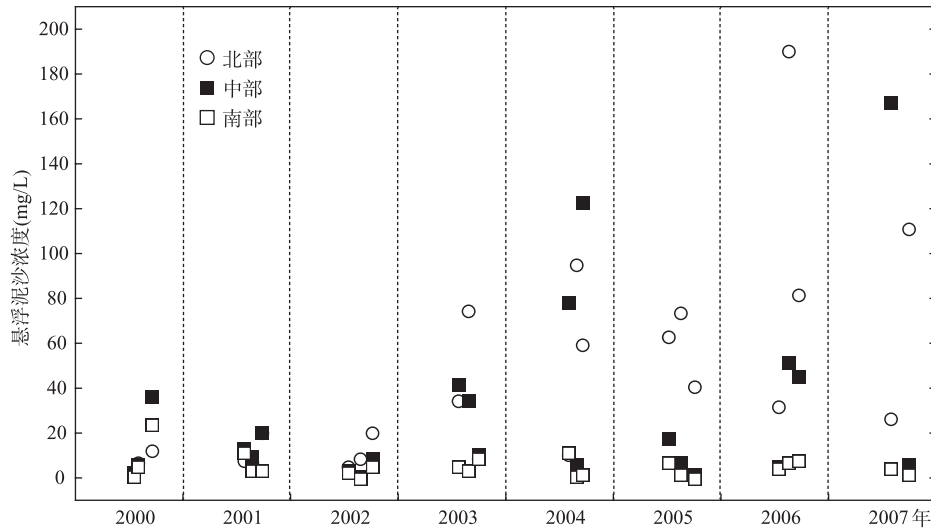


图 5 2000–2007 年 7–9 月份鄱阳湖北部、中部和南部平均悬浮泥沙浓度  
Fig.5 Average suspended sediment concentration from June to September, 2000–2007  
in the northern, central and southern Lake Poyang

#### 4 参考文献

- [1] Jorgensen SE, Loffler H, Rast W *et al.* Lake and reservoir management, Volume 54 (Developments in Water Science). Elsevier Publishers, 2005.
- [2] Pozdnyakov D, Shuchman R, Korosov A *et al.* Operational algorithm for the retrieval of water quality in the Great Lakes. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**(3): 352-370.
- [3] Hu C, Chen Z, Clayton TD *et al.* Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **93**(3): 423-441.
- [4] Zhang Y, Pulliainen JT, Koponen SS *et al.* Water quality retrievals from combined Landsat TM data and ERS-2 SAR data in the Gulf of Finland. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(3): 622-629.
- [5] Davies-Colley RJ, Smith DG. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, **37**(5): 1085-1101.
- [6] Cigizoglu HK, Kisi O. Methods to improve the neural network performance in suspended sediment estimation. *Journal of Hydrology*, 2006, **317**(3-4): 221-238.
- [7] Kirk JTO. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Combridge, Britian: Cambridge University Press, 1994.
- [8] Blom G, Duin EHSV, Lijklema L. Sediment resuspension and light conditions in some shallow Dutch lakes. *Water Science and Technology*, 1994, **30**(10): 243-252.
- [9] Best EPH, Teeter AH, Nair SK. Modeling the impacts of suspended sediment concentration and current velocity on submersed vegetation in an Illinois River Pool, USA. In: APCRP Technical Notes Collection (ERDC TN-APCRP-EA-07), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- [10] Liu WC. Water column light attenuation estimation to simulate phytoplankton population in tidal estuary. *Environmental Geology*, 2005, **49**(2): 280-292.

- [11] Rørslett B. Modelling of underwater light in freshwater lakes using survival and failure time analysis. *Freshwater Biology*, 1996, **35**(1): 11-24.
- [12] Nellis MD, Harrington JA, Wu JP. Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir, Kansas: 1993. *Geomorphology*, 1998, **21**(3-4): 281-293.
- [13] Keiner LE, Yan XH. A neural network model for estimating sea surface chlorophyll and sediments from Thematic Mapper Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **66**(2): 153-165.
- [14] Tyler AN, Svab E, Preston T *et al.* Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(8): 1521-1537.
- [15] Kloiber SM, Brezonik PL, Bauer ME. Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity. *Water Research*, 2002, **36**(17): 4330-4340.
- [16] Islam MR, Yamaguchi Y, Ogawa K. Suspended sediment in the Ganges and Brahmaputra Rivers in Bangladesh: observation from TM and AVHRR data. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(3): 493-509.
- [17] Ruhl CA, Schoellhamer DH, Stumpf RP *et al.* Combined use of remote sensing and continuous monitoring to analyse the variability of suspended-sediment concentrations in San Francisco Bay, California. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2001, **53**(6): 801-812.
- [18] Miller RL, McKee BA. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **93**(1-2): 259-266.
- [19] Li R, Li J. Satellite remote sensing technology for lake water clarity monitoring: an overview. *Environmental Informatics Archives*, 2004, **2**: 893-901.
- [20] Sipelgas L, Raudsepp U, Kouts T. Operational monitoring of suspended matter distribution using MODIS images and numerical modelling. *Advances in Space Research*, 2006, **38**(10): 2182-2188.
- [21] Li RR, Kaufman YJ, Gao BC *et al.* Remote sensing of suspended sediments and shallow coastal waters. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2003, **41**(3): 559-566.
- [22] Yan Z, Tang D. Changes in suspended sediments associated with 2004 Indian Ocean tsunami. *Advances in Space Research*, in Press, Corrected Proof.
- [23] Liu CD, He BY, Li MT *et al.* Quantitative modeling of suspended sediment in middle Changjiang River from MODIS. *Chinese Geographical Science*, 2006, **16**(1): 79-82.
- [24] 张春桂, 张 星, 陈敏艳等. 福建近岸海域悬浮泥沙浓度遥感定量监测研究. *自然资源学报*, 2008, **23**(1): 150-160.
- [25] 刘良明, 张红梅. 基于 MODIS 数据的悬浮泥沙定量遥感方法. *国土资源遥感*, 2006, **2**: 42-45.
- [26] 李云驹, 常庆瑞, 杨晓梅等. 长江口悬浮泥沙的 MODIS 影像遥感监测研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, **33**(4): 117-121.
- [27] 崔丽娟, 张曼胤, 王义飞等. 鄱阳湖湿地环境质量分异及风险表征. *东北师大学报(自然科学版)*, 2006, **38**(1): 114-120.
- [28] 钟业喜, 陈 珊. 采砂对鄱阳湖鱼类的影响研究. *江西水产科技*, 2005, **1**: 15-18.
- [29] Wu G, De Leeuw J, Skidmore AK *et al.* Concurrent monitoring of vessels and water turbidity enhances the strength of evidence in remotely sensed dredging impact assessment. *Water Research*, 2007, **41**(15): 3271-3280.
- [30] Liu W. Monitoring variation of water turbidity and related environmental factors in Lake Poyang National Nature Reserve, China. *International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC)*: 54.
- [31] 徐德龙, 熊 明, 张 晶. 鄱阳湖水文特性分析. *人民长江*, 2001, **32**(2): 21-27.
- [32] 胡细英, 熊小英. 鄱阳湖水位特征与湿地生态保护. *江西林业科技*, 2002, **5**: 1-4.