

# 基于遥感数据的洞庭盆地东部地表垂直形变研究

陈玉冬, 李德平\*, 高海丽, 钟文章 (湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南长沙 410081)

**摘要** 利用 GIS 技术对 2000 年的 SRTM 和 2009 年的 ASTER GDEM 数据进行处理, 得到两个时期之间洞庭盆地东部及其周边区域的地表垂直形变分布图, 然后从整体到局部分析洞庭盆地东部的地表垂直形变分布状况及其原因。结果表明, 东洞庭盆地受构造沉降影响, 大部分地区处于沉降状态, 而局部地区受到泥沙淤积或人类活动的影响较严重, 导致地表抬升; 盆地外的地区, 临湘市、岳阳县和汨罗市东部呈南北向的抬升带, 处于幕阜-九岭隆起之上, 受构造抬升影响, 大部分地区处于抬升状态, 而临湘市和岳阳市西北地区未处于隆起之上, 大部分则处于沉降状态。这对掌握洞庭盆地演变趋势和洞庭盆地的工农业规划建设具有重要的理论意义。

**关键词** 洞庭盆地; SRTM; ASTER GDEM; 地表垂直形变; 地理信息系统

中图分类号 S126 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2014)04-01235-04

## Study on the Surface Vertical Deformation in the Eastern Dongting Basin Based on the Remote Sensing Data

CHEN Yu-dong, LI De-ping et al (College of Resources & Environment Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081)

**Abstract** The surface vertical deformation maps in the east of Dongting Basin were obtained by processing the SRTM data in 2000 and the ASTER GDEM data in 2009 with the GIS technology. And then the spatial distribution and reasons of the surface vertical deformation from whole to local scale were analyzed. Results showed that the eastern Dongting Basin was influenced by tectonic subsidence, and most areas of the basin were keeping in the subsidence state, the others keeping in a state of uplift which were influenced by serious sedimentation and human activities. And outside of the basin, the east of Linxiangshi, Yueyangxian and Miluoshi were influenced by the uplift of Mufu-Jiuling mountain, most areas were keeping in a state of uplift, while the northeastern region of Linxiangshi and Yueyangshi were not in uplift, so most of the areas were keeping in the subsidence state. This has important theoretical significance to grasp the evolution of the eastern Dongting Basin area and the regional planning and construction.

**Key words** Dongting Basin; SRTM; ASTER GDEM; Surface vertical deformation; GIS

洞庭湖是长江最重要的调蓄性湖泊和我国最大的淡水基地。洞庭湖湿地是国家级重点野生动物保护区、亚洲最大的内陆湿地保护区、世界淡水鱼类优质种群资源基因库。环洞庭湖地区是我国重要的商品粮基地和全国最大的水稻种植区, 也是我国重要的棉、油、茶、猪、鱼生产基地。加强洞庭湖生态环境保护, 巩固洞庭湖区农业基础地位, 加快环洞庭湖地区经济发展, 对于加强我国生态文明建设、保障我国粮食安全、建设全面小康社会具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。目前, 洞庭湖扩张或是萎缩的主要因素是洞庭盆地的构造沉降与泥沙淤积<sup>[1-2]</sup>。目前, 国内外关于地表垂直形变的研究方法主要有水准测量<sup>[3]</sup>、GPS 测量<sup>[4-5]</sup>、合成孔径雷达干涉测量技术<sup>[6-7]</sup>等。为此, 笔者利用 2000 年的 SRTM 数据与 2009 年的 ASTER GDEM 数据对洞庭盆地东部的地表垂直形变进行研究, 分析其演变状况, 为环洞庭湖生态经济区的规划建设提供理论依据。

## 1 研究区概况

洞庭盆地形成于白垩纪, 自第 4 纪以来, 洞庭盆地在地质构造上经历了沉降、抬升、沉降的发展变化。迄今为止, 洞庭盆地主体产生拗陷沉降并接受沉积, 盆地周缘抬升并接受风化剥蚀<sup>[8]</sup>。就现代地形轮廓而言, 洞庭盆地为一个断陷盆地, 四周均为隆起: 西侧武陵隆起, 南侧雪峰隆起, 东侧幕阜-九岭隆起, 北侧华容隆起(图 1<sup>[9]</sup>)。该研究中的洞庭盆地范围主要是以盆地自白垩纪开始时发展过程中的地层为根

据, 依据 1:500 000 湖南省地质图<sup>[10]</sup>划定。

目前, 洞庭盆地的演变主要受构造沉降、泥沙淤积和人类活动 3 个因素的制约。其中, 有学者认为, 洞庭盆地的演变是构造沉降起关键作用, 盆地接受沉积沉降, 湖泊扩大; 也有学者认为是泥沙淤积起主导作用, 盆地将接受沉积抬升, 湖泊萎缩<sup>[3-4]</sup>。洞庭盆地今后的演化方向一直是地学界研究的热点。

## 2 基于 SRTM 与 ASTER GDEM 数据的地表垂直形变模型构建

### 2.1 数据来源

**2.1.1 SRTM 数据简介。**SRTM 高程数据是由美国航空航天局、地理空间情报局以及德国和意大利的航天机构联合测量的。该数据有两种水平精度, 分别为 30 和 90 m 分辨率。其中, 90 m 分辨率的(SRTM-3)标称绝对高程精度为 16 m, 标称绝对平面精度为 20 m<sup>[11]</sup>, 是能够免费获得的。SRTM 高程数据由于是使用干涉雷达技术获取的, 因此原始高程数据存在诸多不足<sup>[12]</sup>, 从而导致生产的 SRTM DEM 产品存在许多缺数据区域。虽然目前的 V4.1 版本在这些缺数据区域得到了修补, 但是在局部地区的高程精度仍不是很理想, 且存在异常值<sup>[13]</sup>等。该研究选择的 SRTM 数据为 V4.1 版本的 SRTM-3 数据, 时间为 2000 年, 名称为 utm\_srtm\_59\_07, 格式为 img, 投影为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_49CN, 坐标范围为 110°~115° E, 25°~30° N。

**2.1.2 ASTER GDEM 数据简介。**ASTER GDEM 是美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)共同推出的最新的地球电子地形数据。ASTER GDEM 数据的空间分辨率为 30 m, 垂直精度约为 20 m, 水平精度为 30 m<sup>[14]</sup>。ASTER GDEM 数据存在着一些奇异点和缺陷, 主要表现为云的影响、不同

**基金项目** 湖南省普通高等学校重点实验室开放基金项目(09K020); 湖南师范大学地图学与地理信息系统校级重点学科建设项目。

**作者简介** 陈玉冬(1987-), 女, 四川仁寿人, 硕士研究生, 研究方向: GIS 应用。\* 通讯作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事 GIS 应用开发与自然资源评价研究。

**收稿日期** 2014-01-04

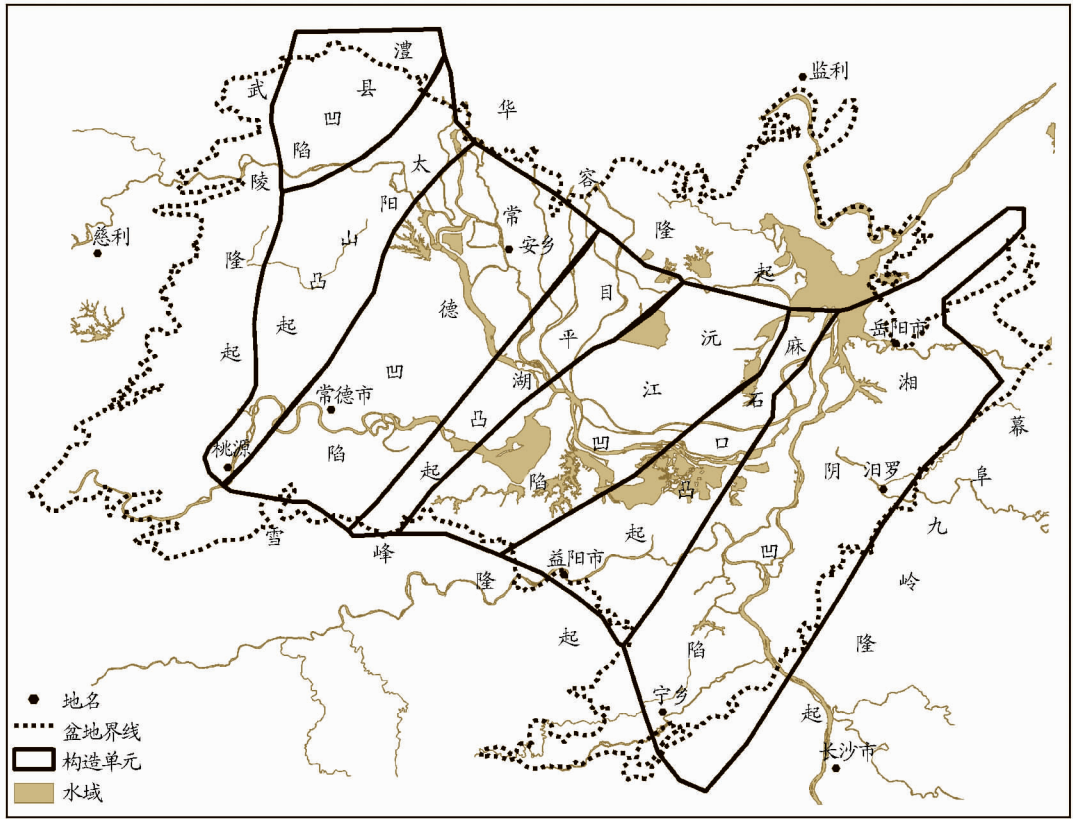


图1 洞庭盆地范围及构造单元

数量的初始 DEM 值的影响、水体值异常<sup>[15]</sup>,在一定程度上影响了数据的准确性。该研究根据研究区的范围,从国际科学数据服务平台上下载了 8 景数据,时间为 2009 年,格式为 img,投影为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_49CN,坐标范围为 110°~114° E,28°~30° N。

**2.2 数据处理流程** 该研究的数据处理流程分为数据准备、数据预处理、形变模型构建 3 大步骤(图 2)。

**2.2.1 数据准备。**根据研究区范围确定所需 SRTM 与 ASTER GDEM 数据的范围,在地里空间数据云网站平台上下载所需数据。

**2.2.2 数据预处理。**对 ASTER GDEM 数据进行拼接、重采样,使得 ASTER GDEM 与 SRTM 数据的投影方式、分辨率一致,对 SRTM 和 ASTER GDEM 进行异常值处理。

**2.2.3 形变模型构建。**通过 ArcGIS 软件平台对 SRTM 和 ASTER GDEM 数据进行空间运算,构建研究区的地表垂直形变模型。

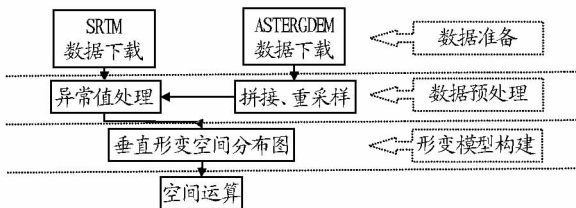


图2 数据处理流程

**3 结果与分析**

**3.1 洞庭盆地东部地表垂直形变类型划分** 为了便于直观地了解洞庭盆地东部各个区域地表垂直形变及其程度,该研

究通过 ArcGIS 的重分类功能将地表垂直形变结果进行重分类。根据得到的形变量将形变程度分为 7 类: < -5 m 为极强沉降区, -5 ~ -2 m 为明显沉降区, -2 ~ 0 m 为一般沉降区, 0 m 为假定平衡区, 0 ~ 2 m 为一般抬升区, 2 ~ 5 m 为明显抬升区, > 5 m 为极强抬升区。为加强洞庭盆地东部内部及盆地周边地形变化的对比,研究区范围为东洞庭盆地及外围部分地区。

**3.2 洞庭盆地东部地表垂直形变分布** 以水域和小流域为根据将洞庭盆地及盆地周边划分为东西南北 4 个部分,该研究以盆地东部为例,分析其形变分布状况及原因。从图 3 可以看出,盆地东部范围内,除水域外的地区,大部分处于一般沉降状态,其余地区基本为假定平衡区,且假定平衡区基本分布在水域周边;另外,华容县至南县之间有一条极细小的明显抬升区,湘阴县亦有极小部分的明显抬升区。盆地外的区域,岳阳县西北有少部分明显沉降区,临湘市西北至岳阳市西北地区是一片一般沉降区,在临湘市与岳阳市相交处存在大片明显沉降区与明显抬升区的混合地带;汨罗市东部、岳阳县东部、临湘市东部相连,呈南北向抬升状态,以明显抬升区和平衡区为主,其中存在少数明显沉降区。

**3.3 洞庭盆地东部地表垂直形变原因分析** 洞庭盆地东部地区处于多个构造单元之上,盆地东侧位于幕阜 - 九岭隆起,盆地内部位于湘阴凹陷、麻石口凸起、沅江凹陷及雪峰隆起之上。因此,盆地内部主要以盆地的断陷下沉作用为主导,整体表现为一般沉降;其中因 SRTM 数据和 ASTER GDEM 数据在水域区域的高程值不稳定或是异常,所以对于



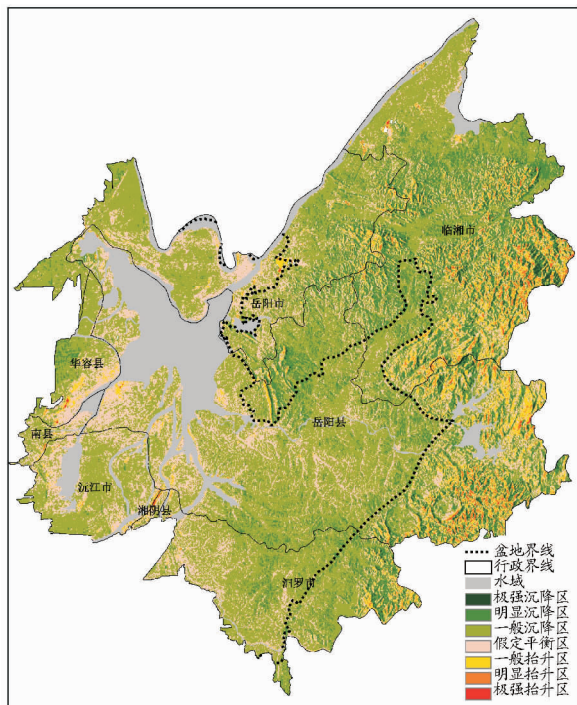


图3 洞庭盆地东部地表垂直形变分布

水域区域处于明显抬升状态或是假定平衡状态的真实情况不作确定性评价;另外,华容县至南县的极细小的一条抬升带,是由于藕河东支在流入东洞庭湖时在沿岸的泥沙淤积以及南县处漉湖泥沙淤积和人类活动导致地表抬升量大于构造沉降量,使得地表呈现抬升状态,且抬升量较大;湘阴县区域内的极小抬升区,主要受草尾河和嵩竹河上游地区携带的泥沙沉淀淤积和人类活动的影响,导致该区域处于一般抬升状态。

盆地外的地区,沿汨罗市、岳阳县、临湘市南北向的明显抬升区位于幕阜九岭隆起之上,受构造抬升作用影响,且抬升程度较大;同时,该地区处于丘陵、低山地区,地形较复杂,受数据在山区的精度及准确性限制,区域内夹杂的少数明显沉降区不作确定性评价;临湘市及岳阳市西北部为一片一般沉降区,该沉降区沿长江分布,受流水冲刷作用与洪湖-湘阴断裂的影响。

**3.4 盆地东部典型地区分析** 在上述洞庭盆地东部全貌分析的基础上,为了加深研究,选取了1:50 000 郭镇市、新墙和桃林图幅区域(简称郭-新-桃地区)与南大膳和新河口图幅区域(简称南-新地区)进行详细分析。南-新地区只有一小部分落入洞庭盆地东部范围,另有一小部分落入洞庭盆地北部范围,大部分落入洞庭盆地南部范围。选择该地区进行典型分析,主要是为了了解3个部分交界处的地表垂直形变状况。

#### 3.4.1 郭-新-桃地区。

**3.4.1.1 地表垂直形变空间分布。**郭-新-桃区域从极强沉降区至极强抬升区的7个形变类型完全,整体上以一般沉降分布为主(图4)。自上而下,地表垂直形变具体分布如下:康王北部及郭镇市北部为一般沉降区,郭镇市附近为假定平衡区;冯万仕、夹铺子、五垸及麻塘镇围成的四边形内,

存在大部分明显沉降区,其中,新开塘与麻塘镇之间以一般沉降为主,但是存在一条狭长的一般抬升带、一条极强沉降带、一条明显沉降带,且同为南北走向;陶家老屋北部是假定平衡区,且存在少部分一般抬升区;从鹿角到鹿角镇再到岳阳县是一片假定平衡区,平衡区周围为一般沉降区;鹿角至苏堤老之间,及水域周边为假定平衡区,但存在极少数一般抬升区;苏堤老、黄秀桥、长湖街以北的整个区域以一般沉降区域为主,其中有少部分假定平衡区,如黄家祠堂、黄市附近,以及零星分布的明显沉降区,如罗家咀和刘家湾东、西部部分地区。

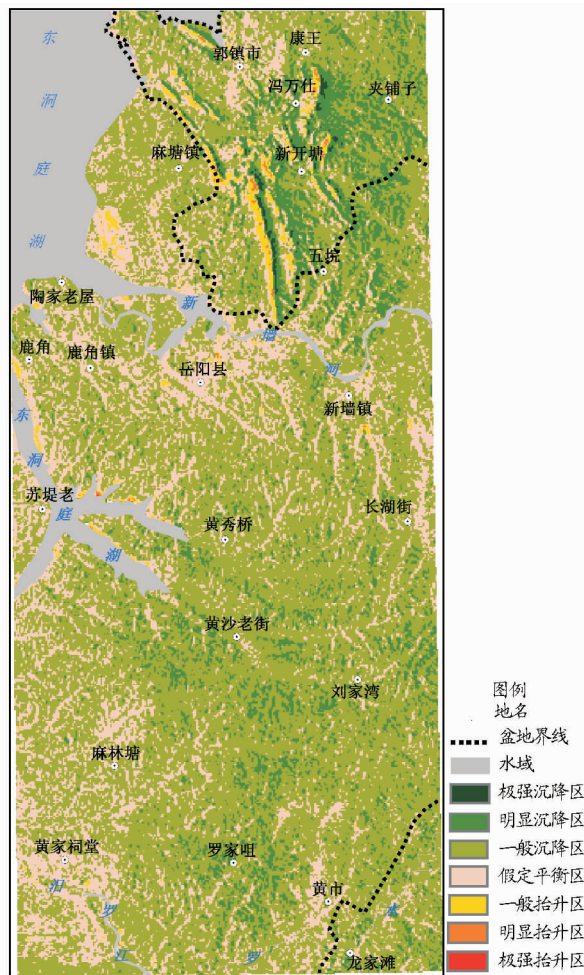


图4 郭-新-桃地区地表垂直形变分布

**3.4.1.2 地表垂直形变原因分析。**结合该区域的地质背景、水域分布、地表环境等,分析该区域地表形变原因。总体上,郭-新-桃区域大部分处于洞庭盆地内,位于湘阴凹陷构造单元之上,因此,盆地内部受构造沉降影响,大体处于沉降状态;而盆地外的区域处于幕阜隆起之上,受构造抬升影响,理论上该区域应处于抬升状态,但实际上该区域基本处于沉降状态,这可能与该区域处于两种不同构造单元的交界处,受到的构造沉降影响程度更大有关,也可能是因为该区域山地地形明显,受到数据本身在山区的准确性影响。

具体而言,在郭镇市区域内,康王北部及郭镇市北部为一般沉降区,在该区域北部是南湖,且位于长江沿岸附近,人

类活动频繁,对地表的沉降起到促进作用。在冯万仕、夹铺子、五垸及麻塘镇围成的四边形内,冯万仕附近的明显沉降区位于黄岭山脉,麻塘镇至岳阳县之间的明显沉降区位于麻布大山、鹰咀山、晏家大山山脉。对比地形图后可知,该区域的高程点处高程值降低,说明这两座连绵的山体处于沉降状态,但是,在麻布大山、鹰咀山、晏家大山山脉西侧存在一条一般抬升带,其原因不明,且数据本身在山区的精度也对结果有一定的影响,因此此处的沉降带和抬升带的地表形变结果不能作确定性评价;此外,在新开塘和五垸附近存在煤矿资源,对煤矿资源的开采导致地表塌陷下沉,因此,在构造沉降的基础上,该区域的沉降更加明显。陶家老屋北部的小部分一般抬升区主要受人类活动的影响。

在新墙及桃林寺区域内,苏堤老、黄秀桥、长湖街以北的整个区域以一般沉降区域为主,主要受到构造沉降影响,水域少,河流的冲刷和泥沙的淤积作用不明显,人类活动没有对地表的垂直形变产生明显影响,因此,在构造沉降的影响下,这片区域主要以一般沉降为主;其中的黄家祠堂、黄市附近的假定平衡区,是因为汨罗江和罗水分别流经黄家祠堂和黄市,对流经区域产生泥沙淤积作用,另外人类沿河流修筑堤坝等对其也有一定的影响,这在一定程度上抵消了构造沉降的影响,使得该区域的地表垂直形变不明显;罗家咀和刘家湾东、西部地区的明显沉降区主要受构造沉降影响,但其余影响因素不明确。

### 3.4.2 南-新地区。

**3.4.2.1 地表垂直形变空间分布。**南-新地区无极强沉降区,只存在明显沉降区至极强抬升区的6个形变类型,整体上以一般沉降为主(图5)。自上而下,地表垂直形变具体分布如下:南湖湾北部存在少部分一般抬升区,而南湖湾西南部为明显沉降区;永福西部存在一小片一般抬升区;南湖湾、玉成垸、金盆农场和南道河围成的北部区域内,一般沉降区与假定平衡区基本持平;南道河、金盆农场和南大膳镇围成的三角形范围内以假定平衡区为主,而南道河至金盆农场存在一条较窄的一般抬升带,在这条抬升带内存在极小的明显抬升区;永福、玉成垸、金盆农场、南大膳镇、主港片、廖潭口北部和子母城围成的近圆形区域内基本为一般沉降区;主港片南部除水域外,大部分为假定平衡区,在平衡区南部存在少部分一般抬升区;廖潭口南部亦有极少数一般抬升区。极强抬升区几乎分辨不出。

**3.4.2.2 地表垂直形变原因分析。**总体而言,南-新区域位于洞庭盆地内部(东、南、北盆地的交汇处),处于沅江凹陷构造单元上,受构造沉降运动影响,以沉降为主,部分区域的地表抬升。

具体而言,南湖湾北部处于抬升状态,该区域滨临大通湖,湖边泥沙淤积严重,且人类沿湖区的作业,使得该区域地表抬升;南湖湾西部的明显沉降区,除受到构造沉降影响外,还受较强烈的人类活动的影响。永福西部的一小片一般抬升区主要受人类活动的影响。南湖湾、玉成垸、金盆农场和南道河围成的区域内,一般沉降区与假定平衡区基本持平,

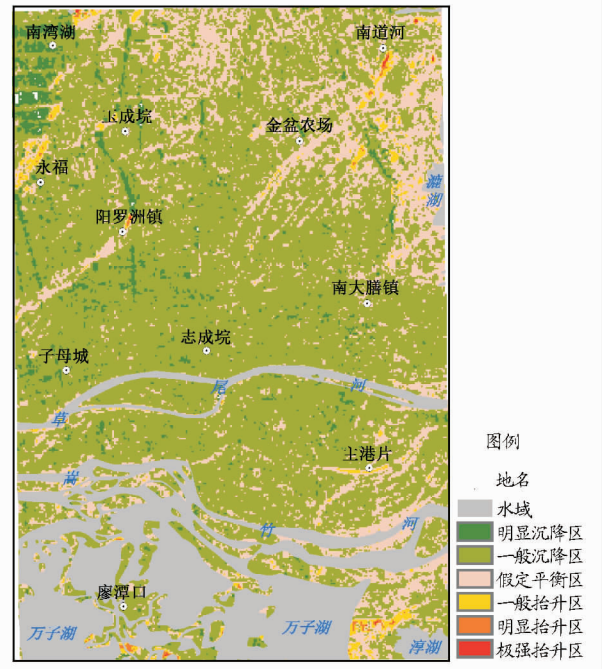


图5 南-新地区地表垂直形变分布

是因为在假定平衡区内,虽然没有临水域,但处于洞庭湖区内,人类的各种较强烈的建设活动对构造沉降起到了一定的抵消作用,使得地表形变不明显;而沉降区内,人类活动相对较平和,在构造沉降的影响下地表下沉。

南道河、金盆农场和南大膳镇围成的三角形范围内以假定平衡区为主,因为在假定平衡区东部是澧湖,澧湖岸边泥沙淤积与人类活动使得地表在构造沉降的影响下地表形变不明显;而南道河至金盆农场的较窄的抬升带,主要受到人类活动的影响,才使得在这条狭窄的区域内地表抬升,其中的极小的明显抬升区也是在相对较强的人类活动影响下产生的。永福、玉成垸、金盆农场、南大膳镇、主港片、廖潭口北部和子母城围成的近圆形区域内基本为一般沉降区,主要受到构造沉降影响,而受到的泥沙淤积和人类活动的影响相对较小,因此该区域呈现沉降状态。主港片南部除水域外,大部分为假定平衡区,这主要是泥沙淤积对构造沉降的抵消作用,使得该区域内的地表垂直形变不明显,而在平衡区南部存在少部分一般抬升区,该区域东南部临淳湖,西部临万子湖,泥沙淤积作用更加明显,且还存在人类活动,使得该区域的地表抬升较明显。廖潭口南部极少数受到泥沙淤积的影响也较强,导致该区域的地表抬升明显。

## 4 结语

(1) 通过从整体到局部的分析,发现东洞庭盆地的内部区域受构造沉降影响,大体处于沉降状态,局部地区受到泥沙淤积和人类活动影响较大,地表呈现抬升;洞庭盆地外围的临湘市、岳阳市和汨罗市的东部处于幕阜-九岭隆起上,以抬升为主,而临湘市和岳阳市的西北地区地表呈现沉降状态。

(2) 利用 SRTM 与 ASTER GDEM 数据,可较快地获得盆地的地表垂直形变结果,但因受数据本身精度的影响,得到



动强制控制画面、参数设置选择画面和参数查看画面等。设计的监控界面能实现对温室大棚控制情况的实时监测,譬如现场参数监控界面,如图 5 所示。

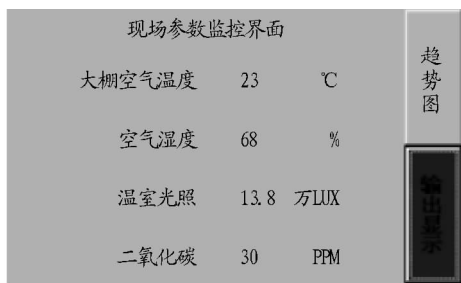


图 5 现场参数监控界面

#### 4 系统实际运行测试

控制系统投入运行后,以温湿度为例,随机选取某一天采集数据进行分析。测试时的起始温度和湿度分别为 32 °C 和 52%, 温度和湿度控制设定值分别为 22 °C 和 70%, 采样时间间隔均为 5 min, 根据采集数据绘制的曲线如图 6 所示。

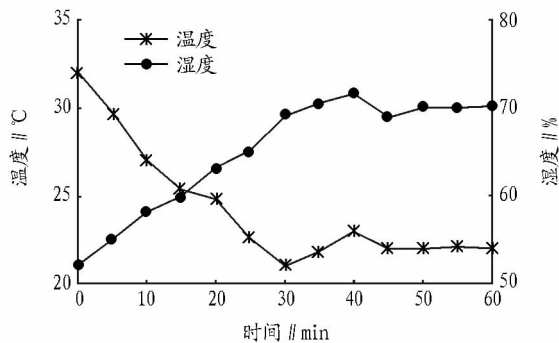


图 6 温湿度控制曲线

由图 6 可知,30 min 左右时温湿度值均达到设定值,然后经 10 min 左右温湿度值达到预设的稳定状态值,控制效果理想。

#### 5 结论

应用 S7 - CPU226、EM231 和 HMD40Y 等设备构建了 PLC 温室控制系统,并在温湿度的控制程序中引入了模糊控制算法,编写了各执行机构的控制程序和模糊算法相关程序,并应用 wincc flexible 组态了该控制系统的监控画面,对温湿度进行了数据采集与分析。结果表明,该系统能够很好地实现对温室中设定的几种环境因子的有效控制,实现对温室中各参数的实时监控,较好地满足温室作物对生长环境的要求。

#### 参考文献

- [1] 刘方,栗霞霄.我国农业温室控制系统控制模式的研究[J].农机化研究,2008(10):223-226.
- [2] 莫建平,蓝海红.基于 WSN 的温室温度测控自动化系统[J].安徽农业科学,2012,40(10):6284-6286.
- [3] 李加利,刘继展,李萍萍.温室光环境及其在立柱栽培中的应用[J].江苏农业科学,2013,41(1):383-386.
- [4] 王忠义,陈端生,黄岚.温室植物生理指标监测及应用研究[J].农业工程学报,2000,16(2):101-104.
- [5] TEIRIEL M,ZHAO Y,MBARAK M, et al. Effect on energy use and greenhouse microclimate through fan motor control by variable frequency drives [J]. Energy Conversion and Management,2004,45(2):209-223.
- [6] 周亚军.电气控制与 PLC 原理及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008:26-51.
- [7] 廖常初. S7-200PLC 编程及应用[M].北京:机械工业出版社,2002:32-47.
- [8] 屈毅,宁锋,赖展翅.基于模糊 PID 控制的温室控制系统[J].计算机应用,2009,29(7):1996-1999.
- [9] 于海业,于立娟,陈丽梅,等.基于模糊控制算法的温室变温管理系统[J].农机化研究,2008(5):25-27.
- [10] 王立舒,杨广林,徐向峰,等.日光温室温、湿度模糊控制系统研究[J].东北农业大学学报,2005,36(5):625-627.
- [11] earth fissures in Jiangyin, China [J]. Environ Earth Sci, 2010, 61: 1085-1093.
- [12] KUEHN F, ALBIOL D, COOKSLEY G, et al. Detection of land subsidence in Semarang, Indonesia, using stable points network (SPN) technique [J]. Environ Earth Sci, 2010, 60: 909-921.
- [13] 栢道远,王先辉,李长安,等.洞庭盆地第四纪构造演化特征[J].地质评论,2011,57(2):261-176.
- [14] 刘海军,余德清,刘登,等.草尾河灵官嘴“跳水”成因的遥感研究[J].国土资源遥感,2006,69(3):65-68.
- [15] 傅宠.地质专报-湖南省区域地质志[M].北京:地质出版社,1988.
- [16] 黄朝安. SRTM DEM 数据空洞插值填补方法对比分析[J].测绘与空间地理信息,2011,34(4):110-112.
- [17] 余鹏春,刘时银,杨萍,等.基于可变窗分析的中国云贵高原地区 SRTM DEM 数据填补方法研究[J].云南大学学报:自然科学版,2010,32(3):273-279.
- [18] 詹蕾,汤国安,杨昕. SRTM DEM 高程精度评价[J].地理与地理信息科学,2010,26(1):34-36.
- [19] 张朝忙,刘庆生,刘高焕,等. SRTM3 与 ASTER GDEM 数据处理及应用进展[J].地理与地理信息科学,2012,28(5):29-34.
- [20] 徐斌.基于 DEM 的洞庭湖盆地非均匀沉降研究[D].长沙:湖南师范大学,2012.

(上接第 1238 页)

的结果只是对洞庭盆地地表形变的一个半定量或定性认识。为了得到洞庭盆地区域的更加准确的形变结果,需选用精度更高的数据以及更可靠的地表垂直形变测量技术,如 D-InSAR 技术。

#### 参考文献

- [1] 梁杏,张人权,皮建高,等.构造沉降对近代洞庭湖区演变的贡献——答李春初先生对《洞庭湖地质环境系统分析》的质疑[J].海洋与湖泊,2001,32(6):690-696.
- [2] 李春初.构造沉降是控制近代洞庭湖演变的关键因素吗?——评《洞庭湖地质环境系统分析》[J].海洋与湖泊,2000,31(4):460-464.
- [3] TEATINI P, FER RONATO M, GAMBOLATI G, et al. A century of land subsidence in Ravenna, Italy [J]. Environ Geol, 2005, 47: 831-846.
- [4] TOSI L, TEATINI P, CARBOGNIN L, et al. A new project to monitor land subsidence in the northern Venice coastland (Italy) [J]. Environ Geol, 2007, 52: 889-898.
- [5] 熊文福,朱文耀,李家权,等. GPS 技术在上海市地面沉降研究中的应用[J].地球物理学进展,2006,21(4):1352-1358.
- [6] WANG G Y, WU S L, SHI B, et al. Large differential land subsidence and