

# 卫星遥感监测城市扩展与环境变化的研究\*

戴昌达 唐伶俐 陈刚 王杰生 杨幼昶

(中国科学院遥感卫星地面站 北京 100086)

**摘要** 本文阐述应用北京地区自1984年至1992年4景秋季的TM图像,通过高精度几何配准,辐射水准归一化,热图像条纹噪声消除,各种干扰因素的识别、压抑、剔除,目标信息的增强、提取,以及背景影像的生成等图像应用处理,直接获得试区8年间城镇建设用地、绿地、水体,城市热岛等环境要素变化动态,快速制出客观反映城市扩展变化的系列图件。

**关键词** 卫星遥感,城市扩展,环境变化,图像应用处理

## 1 前言

实施改革开放政策以来,我国工业化水平迅速提高,城市化速度明显加快。城市的扩展,城市人口的膨胀必将对环境产生重大影响。

为了整治城市化带来的环境问题,发达国家于六、七十年代已广泛开展城市航空遥感调查,为旧城改造,新城建设提供科学依据,收到良好效果。我国也先后在天津、北京、广州、南京<sup>[1]</sup>等城市开展过这类工作。但航空遥感费用昂贵,不易全面推广应用,更难于实现动态监测。

第一颗陆地卫星成功升空后,美国学者应用首批MSS图像制成华盛顿特区彩色卫星影像图。接着各国学者通过对卫星图像的目视判读与自动识别分类,绘制城市土地覆盖类型图,并根据不同时相的图斑差异来研究城市的扩展变化。以后又有学者包括笔者尝试对不同时相的图像进行复合处理,探寻变化因子,计算变化向量等方法<sup>[2,3]</sup>来实现动态监测。但这些有益尝试在压抑干扰因素,排除伪信息,快速、客观、准确确定变化性质与类别等方面都存在着不少问题,有待妥善解决。

我国引进的遥感卫星地面站建成投产后,覆盖我国城乡的TM图像以16天重复一次的频度源源不断接收处理出来。如能有效地用于城市动态监测研究,将对我国城市建设的健康发展发挥重要作用。考虑到城市的复杂性,TM图像空间分辨力的限制以及光谱响应尚不能灵敏反映某些环境信息等不足之处,决定把研究重点聚焦到应用不同时相的TM图像直接提取城镇建设用地扩展、交通干道延伸、绿地消长、水体变化、热岛分布等环境要素变化上,以期发展出一套能满足实用要求的卫星遥感监测城市扩展变化的图像应用处理技术与快速成图方法。

\* 国家自然科学基金资助课题。李传荣,马立全,江平等参与部分工作一并致谢。

收稿日期:1994年5月3日;收到修改稿日期:1994年7月25日

## 2 试区选择与试验研究流程

以北京二环路以内的旧城区和近年变化很大、体育场馆设施比较集中的朝阳区作为主要试验区,总面积 941.5km<sup>2</sup>。

北京市于 1983 年进行过航空遥感调查,那次工作总结了北京市 80 年代初以前的发展变化。正好携带改进型 TM 遥感器的陆地卫星 5 号于 1984 年春发射。秋季是北京的黄金季节,多晴朗天气,获得高质量卫星图像机会多,故决定以 1984 年 10 月 3 日过境的 TM 图像作为监测变化的本底,再选取 1987 年 9 月 26 日,1989 年 10 月 17 日和 1992 年 10 月 25 日 3 景彼此相隔 2—3 年的 TM 图像(轨道号为 WRS123/32) 作为提取变化信息的信息源。工作中还参阅了彩色红外航空像片, SPOT 卫星图像以及近年出版的北京市地图等。

另选我国著名“火炉”城市南京作为副试验区。该市夏季高温闷热是主要环境缺陷。应用 1991 年 7 月 14 日的 TM 图像,分析研究三伏天该市热岛分布状况,制出热特性系列图,并提取植被盖度、水体分布等环境要素信息,以便探索缓解南京市炎热高温的有效途径。

试验研究技术路线见图 1。

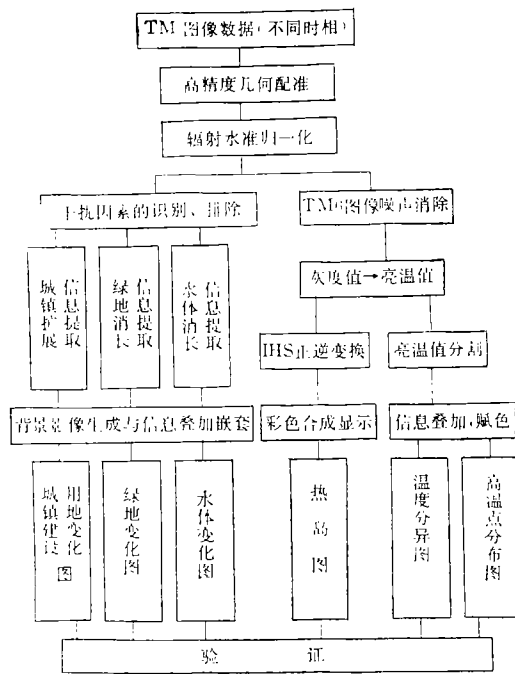


图 1 试验研究技术路线框图

Fig. 1 Flow of study procedure

所有图像应用处理与变化信息提取工作,在自行发展的微机图像处理系统上完成,最

后成果图由该系统自动输出、记带, 然后由地面站图像处理室以数字彩色成像仪, 按  $50\mu$  光点逐个像元扫描成潜影透明正片, 由光学室进行光化学处理, 然后放印出 1:5 万—1:1 万的北京市扩展变化系列图。

### 3 几个关键技术的解决途径

#### 3.1 图像的高精度几何配准

利用不同时相的卫星图像直接提取变化信息, 进行快速动态监测成图, 首先必须解决好不同时相卫星数据的高精度几何配准。

本次试验使用的 1984 年 TM 图像由日本站提供, 其它各景图像则为我站接收处理。由于卫星在运行过程中会发生轨道偏移, 星上探测器的姿态也可能发生细微变化, 加之不同接收站配置的软硬件不尽相同, 故预处理出的不同年份同一景幅 TM 图像之间会产生几何位移。过去已发展了一套选择控制点对、以多项式进行匹配拟合的几何精纠正方法, 一般可保证纠正误差约一个像元, 这对许多应用项目来说, 已满足要求。但这次试验研究变化信息的快速提取, 需把不同时相的图像数据精确地叠合在一起, 然后直接确定各像元所处位置地面是否发生变化, 这就要求配准误差越小越好, 最好能减少到半个像元以内。为了实现这个目标, 我们着重改进控制点选取技术, 即对控制点像元进行分解, 取其局部(可称为子像元), 作为配准依据, 这样就提高了控制点对的定位精度, 两点几乎完全重叠, 从而保证了配准后的图像线状地物鲜明, 斑块状影像边缘清晰。提取出的信息真正反映了地面发生的变化, 准确可信, 不致因配准精度不高, 像元错位而造成“伪变化”信息。经检验配准误差均未超过半个像元, 达到了预期目标。

#### 3.2 图像的辐射水准归一化

大气辐射订正一直是困扰高精度定量遥感发展的难题。因为用户几乎无法取得与卫星同步的大气观测资料来建立精确的大气辐射订正模型和提供有关辐射订正参数。我们从这次试验研究的实际要求出发, 认为可以避开“大气辐射订正”难关, 另辟一条有实用意义的“辐射水准归一化”蹊径。因为试验研究涉及的并不是大气对 TM 图像数据影响的绝对定量值, 而是不同年份的 TM 图像数据中包含着因大气(包括天气)条件不同而产生的数值差异, 它与地面发生变化引起的数值差异混在一起, 会妨碍变化信息的准确提取。如能把各年份图像的辐射水准都归一到同一年份, 那末这个难题就解决了。为此需选取一些可以肯定在各年份都没有发生明显变化且波谱特性比较稳定的地物如水体、裸地, 分析这些地物在各年份各波段图像灰度值的差异, 然后以 1984 年的为基准, 拟合出辐射水准归一化线, 分别对其它各年的图像进行归一化计算, 获得这些年份的新图像数据, 就可以认为基本上归一到 1984 年辐射水准的可用图像数据了。

#### 3.3 城镇建设用地扩展信息提取

城镇扩展变化首先表现在城郊农田、菜地, 转为楼房、交通、场、园等非农业用地。在几百分辨率很高的大比例尺航空像片上, 几乎每条街道、每幢房子、庭园都可以识别出来, 应用不同时期拍摄的大比例尺航空像片, 很容易看清各个时期城镇结构细节和扩展变化情况。然而目前民用卫星图像达不到这样高的分辨力。国内外学者研制处理出的某些城市

卫星影像图,对于了解城市概貌很有用处,可是要用于深入分析城镇细节就显得无能为力了。通过对城镇土地覆盖类型的自动识别分类,然后对比分析两个时期的分类结果来掌握城镇扩展变化,理论上可以达到一个像元面积(约 $900\text{m}^2$ )的精度,实际上现有自动识别分类器很难完全排除错分误判现象,满足不了实用要求。

南皮县土地采用变化监测试验研究中曾发展了一种“变化向量计算”法,也因城市过于复杂,效果不佳。通过大量数值分析和反复试验摸索,进一步明确了提取城镇扩展变化信息的主要难点在于:

(1) 不同材料结构、布局的建筑群具有不同的光谱特征与纹理结构,类内差异性大,特别是某些已征用的旷地、露天仓库、材料场等更易与收割后的残茬地混淆。

(2) 高层建筑阴影区与某些水体的光谱特征仅有细微差异,自动识别分类时很易错分,把阴影区归入水体类,或把某些水体归入阴影类。

(3) 新扩展的区域及城镇边缘多菜地,蔬菜花色品种繁多,又有露天与塑料大棚之分。塑料布还有不同的颜色与透明度,如此等等,使得菜地类内的光谱离散性很大,甚至超过其它地类间的光谱差异性。这样就必然发生错分误判问题。

以上这些难点采取一般的分层分类技术<sup>[4]</sup>很难获得满意效果,且费时太多,不符合快速成图要求。最后决定综合运用图像自动识别分类与目视判读相结合的技术方法;一方面对各年份图像进行监督分类,另一方面,把经增强处理具有分析城镇最佳效果的彩色图像显示在监视器上,依据专家判读知识(必要时参阅各种有关资料),审定各年份城镇建设用地图斑界线,然后进行叠合嵌套就得出了城市扩展即居民点用地变化图。

### 3.4 城市绿化度变化信息提取

城市绿化包括种植草皮、花卉、片林和街道林带。国内外大量研究表明,利用叶绿素在红光的强吸收和近红外的高反射的强烈反差来提取植被信息,仍是目前能采用的最佳方法<sup>[5]</sup>。表征这种反差程度的算法有植被指数 KL 及 KT 变换等多种。通过试验比较,我们觉得归一化植被指数效果不错,适合城市绿化度调查,可以敏锐地检测出面积不到一个像元的绿地,而长得较好的行道树,公园和某些较大庭园里的片林、草地及达到一定规模的花丛等。

根据归一化植被指数算式,先分别对各年的图像数据进行计算,然后在此基础上进行密度分割、加、减及嵌套等运算,就能提取出试区绿地变化信息。

由于试区包括部分以农田为主的郊区,所用图像分别成像于9月下旬至10月下旬。此时正值秋收、秋种,农田换茬季节。农作物差异必然会加剧植被指数变化的复杂性,而我们所关心的主要是非农田植被的消长情况。因此必须采取限定变化图斑大小等后处理,以消除掉因农作物差异造成的植被消长信息,才能得出准确反映城、郊区由林、草、花卉构成的绿地消长状况。

### 3.5 水体变化信息提取

由于水体与其它绝大多数地物的光谱特性有明显差别,所以一般都比较容易被识别出来,但这次试验研究中却碰到一个棘手问题,即某些水体与某些高层建筑的阴影在光谱特性上相当近似,自动识别分类时很容易彼此混淆。尝试了多种分类方法,包括新发展的 SVD 法,效果仍不理想。经过对多个样点的波谱数值分析,发现水体与高楼阴影之间,从

总体上说光谱差异很小,但它们在 TM 4,5,7 波段的波谱曲线走向上稍有不同: 水体从 1 至 7 波段(不含第 6 波段)的波谱曲线呈逐渐下降的趋势,而阴影区在 4 波段之后至 5,7 波段处比较平稳,有的还略有抬升,根据这种规律性,我们先把水体和阴影区作为一类,从其它地类中区分出来,然后采取“波谱趋势判定法”再较好地提取出水体信息,并可区分开水质好的清水与水质差的污浊水。后者在可见光区常有较高的反射率。

运用上述方法分别对各年份的 TM 图像进行水体信息提取,然后把 1984 与 1992 两年的结果进行嵌套运算,便得到了 1984 至 1992 年间的水体变化图。

### 3.6 热图像条纹噪声的消除

近几年地面站接收处理出的 TM6 波段图像一般都存在深浅相间的横纹条带状噪声,严重影响使用效果,甚至不得不放弃使用,因为这种噪声造成的灰度值差异损害了波段数据反映地物热状况的真实性。

造成横纹噪声的原因是相当复杂的。通过试验研究表明,采取在原图像每一行数据加一个该行数据均值与邻近条带区域数据均值的偏移量的计算处理,收到良好效果。除局部区域个别数据梯度变化大的以外,绝大多数 TM 热图像原有的似百叶窗式噪声基本消失,为应用 TM 图像热信息扫除了障碍。

### 3.7 背景影像的生成

为了使提取出的变化信息能落实到具体位置,把它们的空间分布状况清晰又详尽地反映出来,既便于使用者一目了然,也便于对监测出的变化信息进行检查验证,这样的成果才具有真正的实用价值。为此萌生了以清晰度高,现势性强的影像作为变化信息载体的构想。通过对比试验,把城镇建设用地扩展信息,绿地变化信息,水体变化信息分别嵌套到 1992 年 TM3 或 4 波段黑白图像上,新扩展用地呈灰品色,原建设用地呈灰黄色(图版 1 图 1);新增绿地呈黄色,消失绿地呈红色,原绿地呈绿色;新增水体(包括水质明显改善的水体)呈浅蓝色,消失水体呈红色,原水体深蓝色;道路、渠系、农田、机场等背景地物均以不同灰度和鲜明的形状清晰地显示出来。在使用 TM6 波段图像提取城市热特征信息时,采用 IHS 彩色变换技术,以经过亮温换算的 6 波段数据作为  $H$  变量,以几何分辨率较高,反映城市下垫面背景地物信息丰富的 5 或 4 波段黑白图像作为  $I$  变量,这样处理出的图像反映地面温度差异的颜色变化符合人眼区分冷暖色调的习惯感觉,即红色表示高温,蓝色表示低温。而且可看到清晰的背景影像(图版 1 图 2)。可以说这次试验研究较好地掌握了生成高清晰度背景影像在波段选择,增强及与所提取的变化信息协调、嵌套等一系列技术诀窍,从而大大提高成果图的实用性。

## 4 成果图的分析与讨论

以上关键技术的解决,为应用 TM 图像快速准确地提取城市扩展变化信息奠定了基础,得以在较短时间和以较小代价自动输出北京试区 1984—1992 年间建设用地、绿地、水体、热岛等环境要素变化图以及反映火炉城市南京的夏季热特性系列图。对这些图件和数据进行分析,获得如下认识:

(1) 北京城镇规模不断扩展,菜地在近郊大幅度减少,逐步向远郊区转移。试区内

1984 年城镇建设用地面积  $302.8\text{km}^2$  (图版 1 图 2 灰黄色图斑), 1992 年扩展到  $382.7\text{km}^2$ , 新增  $79.9\text{km}^2$  (图版 1 图 2 灰品色图斑)。增幅达 26% 多, 平均每年递增近 3%。其中朝阳区总面积  $476\text{km}^2$ , 1984 年建设用地  $122.4\text{km}^2$ , 1992 年增加到  $167.7\text{km}^2$ , 增幅达 37%, 每年递增约 4%。

对比 1984 年与 1992 年的图像, 并参阅航空像片等资料, 清楚看出: 新扩展的建设用地大部分原为菜地, 部分为种植作物的大田和各种废弃地, 如砖瓦窑、取土坑、塘、坟场、垃圾场等。近郊区种植作物的大田已基本消失, 菜地大幅度减少, 逐步向远郊区转移。

(2) 交通干道自老市区向新市区和郊区延伸, 构成密度颇高的新道路网络。图上清晰显示 80 年代中以来新建、扩建的三环、四环等干道, 立交桥在 1984 年的 TM 图像上仅见于二环路, 全试区不超过 10 座, 而在 1992 年图像上几乎遍布于二、三、四环的重要交叉路口, 总数达 60 余座, 表明北京市的交通设施在不断改善。

(3) 城市绿化程度有所提高, 绿地面积不断增加。试区 1984 年绿地面积约  $132\text{km}^2$ , 其中  $19.4\text{km}^2$  的绿地 (主要是菜地或农田) 陆续转为建设用地。这 8 年间新增绿地约  $19.7\text{km}^2$ , 都是陆续营造的片林、林带、行道树、成片草皮花卉等, 主要集中于新建、扩建的公园、体育场馆及交通干道两侧。城北大屯村至立水桥一带, 结合清理垃圾场营造的林带与片林生机盎然, 在绿地变化图上以黄色的条带或小斑块清晰地显示出来, 展示了发展中国家运用生物措施处理城市垃圾的一条成功经验。从图还可看到北海公园内近团城处有个红点, 那里原是一片荷花地, 80 年代末, 修建成水上儿童乐园, 因此显示为消失掉的绿地。可见提取出的绿地变化信息相当精确可信。但应指出: 由于 1992 年 TM 图像的过境日期为 10 月 25 日, 比 1984 年的晚 22 天, 这段时间北京地区植被叶绿素活度下降快, 而且 1991、1992 年间新种植的幼树、草皮、花卉等覆盖度尚不高, 遥感获得的植被信息不强, 这些都会使遥感监测出的绿地增长数量偏低, 不足以充分反映北京市 8 年间绿化成果的全貌。

(4) 人工水面显著增多, 某些河道、湖、池水质明显改善。1984 年全试区仅有水面  $3.5\text{km}^2$ , 其中约  $1.4\text{km}^2$  的臭水坑塘沟渠经整治改造为建设用地, 在水体变化图上显示为红色图斑, 多见于城东、北郊。这 8 年间新增水面达  $15.6\text{km}^2$ , 比原有水面增长 3 倍多。增加的水面大部分为人工养鱼池, 形状规则排列整齐, 集中分布于城东、北郊相对低洼地段。故宫周围的筒子河曾经严重淤积污染, 80 年代中后期清淤治污, 水质明显好转, 在提取变化信息时, 因它与新增水面的参数相近, 为节省费用没有做进一步处理, 而把两者归并在一类, 均以浅蓝色表示。在水体变化图上还可看到环绕城西南的通惠河上段也显示为浅蓝色, 意味着这段河道已经疏浚。但自黑龙潭至东三环路拐弯交汇处, 蓝色线条基本中断, 表明这段河道淤塞、污水排泄不畅的面貌尚未改观, 有待整治。该图左下角陶然亭公园内有块红色图斑, 经查证, 以前是湖面, 1992 年成像时排干整修, 图件客观地反映了这种变化。此外, 在后海的左岸出现一红点, 这是几年前在宋庆龄故居附近的游船码头旁新建的碰碰车游乐场, 钢板遮盖了水面所致。这又一次表明本试验提取出的水面变化信息也是相当精确可信的。

(5) 北京、南京两市热岛结构与展布状况明显有别。对比分析两市的热岛图, 清楚看到, 南京市热岛分布与城廓线基本一致, 成一整体, 体现了大多数现代都市的热岛特征(见

图版 1 图 3), 而北京市因市中心基本上保存了明清皇宫御园风貌, 建筑物疏落有致, 花草树木、湖塘沟渠相映交错, 既不存在现代都市那些高能耗企业, 又有大片绿地水面调节, 从而大大降低地面热辐射强度, 形成与郊外差不多的低温带, 把城市热岛分割成东南、西南数片, 可见城市结构布局对热岛的形成与展布有着决定性作用。

## 5 结论

(1) 本试验研究发展出的一整套应用不同时相 TM 图像直接提取城市扩展变化信息、进行快速成图的技术方法是切实可行的, 其中对不同时相图像进行高精度几何配准与辐射水准归一化处理是先决条件; 识别、抑制与排除干扰因素, 增强、突出、提取目标信息是核心内容; 生成清晰的背景影像则是提高成果图实用价值的必要举措。

(2) 北京市自 80 年代中以来, 道路网密度加大, 绿化程度提高, 水面明显增多, 污水水体有所减少, 这些都意味着环境质量在某些方面向好的方向发展, 使我们有理由相信, 在城市扩展过程中, 如能增强环保意识, 重视整体布局规划, 抓好配套工程建设, 落实切实有效措施, 城市环境质量不仅不会随着城市扩展恶化, 反而有可能逐步得到改善和提高。

(3) 城市热岛强度很不均匀, 高温点都出现在高能耗、高热源的工厂、火车站等处。如果注意城市结构布局, 有大面积绿地、水体散布在建筑群中, 并把高能耗、高热源企业分割包围, 则城市热岛现象肯定会得到缓解, 甚至消失。北京、南京两市热岛展布状况及内部结构的差异正好从正反两方面表明了这种可能性。特别是植树绿化, 效果既好, 又易实施, 应予高度重视。

## 参 考 文 献

- [1] 陈丙威等. 城市遥感分析. 南京: 南京大学出版社, 1991.
- [2] M. A. ALWASHE, Monitoring Vegetation Changes in Al Medinah, Saudi Arabia, Using Thematic Mapper Data, International Journal of Remote Sensing, 1993. Vol. 14, No 2, p. 191—198
- [3] 王杰生, 戴昌达等. 土地利用变化的卫星遥感监测, 环境遥感, 1989, 4(4): 243—248.
- [4] 戴昌达等. TM 在辽河平原土地利用分类中的应用试验, 见: 陈述彭等著. 遥感地学分析. 北京: 测绘出版社, 1989. 131—132.
- [5] R. Caloz etc. Description of Methodology for Biomass change Mapping With the Use of Landsat TM Data, Proceeding of IGARSS 86 Symposium, Zurich, 1986. p. 254.

## Monitoring of Urban Expansion and Environment Change Using Satellite Remote Sensing Data

Dai Changda, Tang Lingli, Chen Gang, Wang Jiesheng, Yang Youchang

*(Remote Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences)*

**Abstract** A method of monitoring urban expansion and environment change based on TM data is described. Four WRS 123/32 scenes of TM images of Beijing city acquired on Oct. 3, 1984, Sep. 26, 1987, Oct. 17, 1989 and Oct. 25, 1992 respectively were registered each other with high geometric accuracy less than 0.5 pixel errors and normalized at the same radiative level of 1984's TM image. Through numerical analysis of TM data, a set of effective processing, interfering factors were eliminated in extracting urban expansion and environment change information from 1984 to 1992. Finally, a set of variation maps of built-up area, greenlands, water body and heat island were obtained by means of micro computer image processing system. The built-up area extended about 3% each year. The water body increased from 4.9 to 19.1 squarekms. The greenlands where the trees, shrubs, grass and flowers were growing, have been changed from 132.1 to 151.7 squarekms. All of these demonstrate that the quality of Beijing environment has been improved gradually during the last eight years.

**Key words** Monitoring, Urban expansion, Environment change, Image applied processing