藏北高原区 DEM 高程与坡度值提取的误差分析

刘 飞[1,2], 范建容[1], 郭芬芬[1,2], 张怀珍[1,2]

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 高程是数字高程模型(DEM)的基本信息,坡度是 DEM 进行地形分析的重要描述性因子之一。选取藏北高原区为研究区域,在实测 GPS 高程值和实测坡度数据的基础上,对 SRTM 与 ASTER GDEM 高程值和提取的坡度进行了误差分析。研究表明:(1) SRTM 和 ASTER GDEM 在采集高程值时误差较小,二者与实测值之间的 Pearson 相关系数分别为 0.975 和 0.994,中误差(RMSE)为 57.381 和 31.106,精度比率(AR)为 2.089 和 1.976,相对平均误差(R_ME)为 1.1%和 0.7%;(2) SRTM 提取坡度的误差较大,而 ASTER GDEM 提取的坡度误差较小,二者与实测值之间的 Pearson 相关系数分别为 0.878 和 0.946,中误差(RMSE)为 4.014 和 2.395,精度比率(AR)为 1.238 和 1.034,相对平均误差(R_ME)为 21.5%和 5.5%;(3) 频率累计坡谱能直观地表现 DEM 提取坡度的误差大小。

关键词: 坡度; 误差分析; 坡谱; 藏北高原区

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2011)06-148-04 **中图分类号**: S157, P208

Error Analysis of Elevation and Slope Derived from DEM in Northern Tibet Plateau

LIU Fei[1,2], FAN Jian-rong[1], GUO Fen-fen[1,2], ZHANG Huai-zhen[1,2]

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: SRTM and ASTER GDEM are public DEMs(digital elevation models), which are used widely in terrain analysis. Elevation is the base information for DEM, and slope is one of the most important DEM terrain representation factors. Based on the actual measurement data of elevation and slope, we measured the error of the DEM and slope using the methods of correlation analysis, accuracy analysis, slope spectrum analysis and regression analysis in the Northern Tibet Plateau. The results showed as follows: (1) There was some small errors in the elevation data derived from SRTM and GDEM. The Pearson correlation coefficient between elevation data and the actual measurement is 0.975 and 0.994, the root mean square error (RMSE) 57.381 and 31.106, the accuracy ratio (AR) 2.089 and 1.976, and the relative mean error (R_ME) 1.1% and 0.7%. (2) There is more error with the slope data derived from SRTM than from ASTER GDEM. Compared with the actual measurement, their Pearson correlation coefficient is 0.878 and 0.946, the root mean square error (RMSE) 4.014 and 2.395, the accuracy ratio(AR) 1.238 and 1.034, and the relative mean error (R_ME) 21.5% and 5.5%. (3) The slope spectrum is a new way in terrain analysis, and we found that the accumulative frequency slope spectrum can visually indicate errors in slope derived from DEM.

Keywords: slope; error analysis; slope spectrum; Northern Tibet Plateau

根据 DEM 误差的产生来源,可以将 DEM 误差分为栅格采样点上的高程采样误差及采样点之间的地形描述误差[1-2]。用实测值对 DEM 高程误差研究已有相应研究,如 Andy 和 Jorge[3-4]选择热带雨林地区洪都拉斯的一个试验样区,将 GPS 野外实测数据与 SRTM 数据和 1∶5 万地形图建立的 DEM 比较分析后认为,SRTM 数据的高程采样精度优于 1∶5 万地形图。而用实测值对 DEM 描述性因子(坡度,坡长等)进行误差分析还鲜见报道。坡度能够反映地表形态的变化,是决定地表物质与能量再分配的关键地

收稿日期:2011-01-24 **修回日期**:2011-03-22

资助项目:国家"十一五"科技支撑计划项目"西藏高原国家生态安全屏障保护和建设关键技术研究与示范"(2007BAC06B06-01)

作者简介:刘飞(1985—),男(汉族),四川省简阳市人,硕士研究生,主要从事环境遥感与地理信息系统应用研究。E-mail:liufeisuli@163.com。

通信作者:范建容(1969—),女(汉族),四川省井研县人,博士,副研究员,主要从事遥感与地理信息系统应用和山地土壤侵蚀研究。E-mail:fjrong@imde.ac.cn。

形因子,在土壤侵蚀定量研究中扮演着至关重要的角色,如通用土壤侵蚀模型等。对于土壤侵蚀坡度因子的获取,一般采用 DEM 数据提取得到。对坡度的研究,在陕北黄土地区已有大量研究[5-8],然而对于藏北高原地区的坡度研究还较少。

本研究通过实测 GPS 高程数据和实测坡度值,对 SRTM 与 ASTER GDEM(以下简称 GDEM)数据高程和提取的坡度进行误差分析。在对高程误差进行分析时,采用相关分析、数值精度分析与线性回归拟合的方法;在对坡度误差分析时,进行了相关分析、数值精度分析以及坡谱分析。

藏北高原区是青藏高原典型的草原地带,畜牧业发达,但是生态环境极其脆弱,水土流失严重。选择的实验区位于纳木错与色林错之间。地理坐标介于 90°—91°E,30.5°—31.5°N,海拔平均高度在4 500 m 以上。该地海拔较高,热量不足,气候严寒干旱,含氧量仅为海平面的 1/2,限制了农业的发展,但广阔的天然草原,可供家畜放牧采食,是自治区主要发展畜牧业的地区。研究区无高精度地形图,SRTM 和 GDEM 数据在该区域成像效果较好,无高程空值区。

1　材料与方法

1.1　SRTM 和 GDEM 简介

SRTM 数据获取的基本原理是利用合成孔径雷达卫星对同一地区进行 2 次 SAR 成像,对 2 幅图像中的相位进行干涉处理,得到它们的干涉图像,再从干涉图像中的相位信息获取地形高程数据[9]。由于在获取数据的过程中,使用的雷达信号受到的干扰、传感器平台的系统畸变及后期干涉图像处理过程中的不确定性等因素的作用,使 SRTM 的数据精度受到影响。

GDEM 是采用全自动化的方法对 150 万景的 GDEM 存档数据进行处理生成的,其中包括通过立体相关生成的 1 264 118 个基于独立场景的 GDEM 数据,再经过去云处理,除去残余的异常值,取平均值,并以此作为 GDEM 对应区域的最后像素值。纠正剩余的异常数据,再按 1°×1°分片,生成全球 GDEM 数据[10]。

1.2　数据获取与处理

(1) SRTM 数据和 GDEM 数据获取与预处理。SRTM 数据和 GDEM 数据均来自于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(http://datamirror.csdb.cn)。NASA 向公众提供的 SRTM 数据为经纬度坐标,采用 WGS84 椭球参数,空间分辨率为 3″(约 90 m);GDEM 中国区域所有地形数据采用 UTM/WGS84,30 m 分辨率。

在水土保持研究中应用 DEM 提取坡度,一般先进行填挖处理,使之成为具有"水文学意义"的 DEM,然后运用公式计算得到坡度。本研究在 ArcInfo Workstation 的 Grid 下,对数据进行拼接(merge/mosaic)、剪切(gridclip)得到研究区 DEM 数据,然后填挖(fill),提取坡度(slope),单位为度(°)。以上数据统一采用 WGS 84 坐标系,UTM(通用横轴墨卡托)投影。

(2) 采样数据获取与处理。采用 GPS 定位经纬度,并打点记录下高程值,经纬度单位为度分秒(如 90°0′16.52″E,31°24′41.504″N),高程单位为米(如 4 711 m);用坡度规在该采样点上测量坡度值,单位为度分(如 6°20′);用罗盘仪读取坡向,单位为度分(如 185°00′)。采样点共 154 个,分布于测量坡型的上、中、下这 3 个坡位。

在应用实测坡度数据时,将其转换为度,如 6°20′转换为 6.333°,以便和 DEM 提取的坡度值进行对比计算。坡向数据以辅助得到测点 DEM 坡度数据。考虑到 DEM 提取的坡度是从周围点计算出来,在确定 DEM 坡度值时采取的方法包括:① 若采样点落在 DEM 栅格的中间位置,则记录该栅格坡度值;② 若采样点落在 DEM 栅格边缘或者界线上,则结合坡向计算该栅格坡度值与坡向临近栅格的平均值。

2　结果与分析

通过对比附图 1 可以发现,GDEM 数据能更好地反映研究区细节坡度信息,即 GDEM 数据提取的坡度精度优于 SRTM 数据,这说明高精度的 DEM 能够反映局部地区的地形起伏变化。

2.1　SRTM 与 ASTER 数据高程误差分析

分析可知,SRTM 和 GDEM 的高程值与实测高程之间存在较好的线型相关性。显著水平为 1%时,Pearson 相关系数为 0.975 和 0.994,p 值均为 0.000。在 95%置信水平进行拟合,拟合方程分别为:

$$y=1.197x-989.300,\quad R^2=0.901$$

$$y=1.237x+221.470,\quad R^2=0.999$$

常用 DEM 数值精度模型有中误差、标准差以及精度比率等[11]。中误差(RMSE)能从整体上描述地形参数与其真值的离散程度,值越大表明越离散,精度越低;标准差(SD)能消除系统性误差;精度比率(AR)用来比较分析不同空间尺度、不同地形表面

DEM 与地形参数精度，其值越小表示精度越高。计算公式为：

$$RMSE=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i^2/n} \quad (1)$$

$$SD=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_i-ME)^2/n} \quad (2)$$

$$AR=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i^2/\sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_i-ME)^2}=\frac{RMSE}{SD} \quad (3)$$

$$ME(\text{平均误差})=\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i/n \quad (4)$$

式中：ε——真值与采样值之差；n——误差个数。

把实测高程值作为真值，DEM 采样高程作为采样值，计算得到：SRTM 和 GDEM 与实测值之间的中误差(RMSE)为 57.381 和 31.106，精度比率(AR)为 2.089 和 1.976。很显然，在高程采样上 GDEM 比 SRTM 有更高的精度。在这里引入平均误差与实测值均值的比值来进一步刻画精度问题，称为相对平均误差(R_ME)，公式为：

$$R_ME=ME/\bar{z}=\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i/\sum_{i=1}^{n}z_i \quad (5)$$

式中：z_i——第 i 个实测值。由公式(5)计算得到，SRTM 和 ASTER GDEM 与实测值之间的相对平均误差为 1.1%和 0.7%。数值精度分析表明，SRTM 和 GDEM 在高程采样上保持了较高的精度；GDEM 高程精度要优于 SRTM。

2.2 DEM 提取坡度的误差分析

2.2.1 误差产生的原因 大量的研究和实践表明，地形曲面的复杂性远远超出了目前所采用的数学和计算模拟手段的能力[12]。虽然通过曲面拟合和近似可以得到地形曲面的近似数学表达式，但这些表达式所描述的曲面在可操作性的限制下还远不能满足精确描述地形曲面的要求。从几何角度来说，地形曲面本身是一个连续面，在其上处处都应能得到描述其几何形状的特征值。然而，在很多实际情况中，这一曲面上却有相当明显的不连续现象，如断崖、陡坎等，因此造成了连续函数表达的地形曲面上的不连续现象，从而形成大量的误差，增加了不确定性程度。严格地讲，坡度是对地面微分面域倾斜程度的度量。由于 DEM 采样得到的是离散的高程点集，只能无限地接近，而不能形成连续体，这是 DEM 提取坡度不确定性的根本原因。除此之外，还有采样机理、地形复杂程度、栅格提取坡度的算法等问题。从理论上讲，这种不确定性是不可避免的。地形复杂程度主要是从尺度效应方面影响 DEM 提取坡度的不确定性，地形越复杂就越需要更高分辨率的 DEM 来描述，从而减小误差。从目前来看，在利用 DEM 提取坡度值的过程中，大都是在 3×3 分析窗口中采用几何平面拟合或差分方法获得坡度值，这种拟合与差分也增加了 DEM 提取坡度的不确定性。

2.2.2 相关性与数值精度 相关分析结果表明，3 种坡度之间有一定的线性相关性。在 1%显著水平上，SRTM 坡度与实测坡度之间的 Pearson 相关系数等于 0.878，GDEM 坡度与实测坡度之间的 Pearson 相关系数等于 0.946，SRTM 坡度与 GDEM 坡度之间的 Pearson 相关系数等于 0.897。

用实测坡度作为真值，DEM 提取的坡度作为采样值，由公式(1—5)计算得到中误差、标准差、精度比率以及相对平均误差(表 1)。

数值精度分析结果均表明，GDEM 坡度精度高于 SRTM 坡度；提取的坡度与高程相比，坡度的精度更低。

表 1 研究区提取数值精度分析

项 目	中误差(RMSE)	平均误差(ME)	标准差(SD)	精度比率(AR)	相对平均误差(R_ME)
SRTM 高程	57.381	50.377	27.472	2.089	1.1%
SRTM 坡度	4.014	−2.366	3.242	1.238	21.5%
GDEM 高程	36.106	31.143	18.269	1.976	0.7%
GDEM 坡度	2.395	−0.606	2.317	1.035	5.5%

2.2.3 坡谱分析 坡谱是地学分析的新方法和新思路[13-14]。运用坡度频率累计坡谱进行误差直观研究。

图 1 是坡度累计得到的坡谱，有关坡谱的研究文献中一般都使用分级坡谱，为了研究的需要提出累计坡谱，更直观地表现坡度衰减。关于坡度衰减，杨勤科[15]等人已有大量研究。这种衰减使基于中低分辨率 DEM 提取的坡度表面(中低分辨率坡度)不能如实表现地形起伏，使提取的坡度值与真实地面坡度值之间产生较大误差。坡度衰减越厉害，坡度总误差也越大。

从坡度衰减机理的角度分析发现，SRTM 数据提取的坡度衰减大于 GDEM 提取的坡度衰减程度，这直观地表现出 SRTM 数据提取坡度值的总误差要远大于由 GDEM 提取的坡度值。

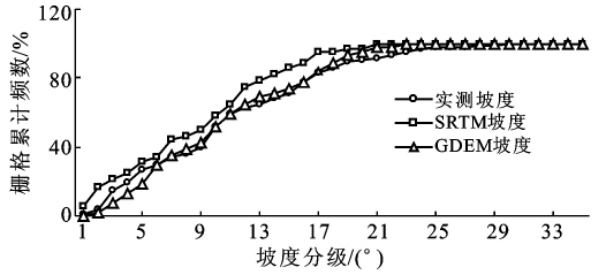


图 1　坡度频率累计条件下的坡谱

3　结 论

(1) SRTM 与 GDEM 采样得到的高程误差较小,两种 DEM 高程数据之间存在一定的线性关系。

(2) SRTM 提取的坡度的误差比 GDEM 提取得到的坡度大得多,相对平均误差为 21.5%和5.5%。本研究认为 SRTM 提取的坡度不适合在研究区应用。

(3) 坡谱分析是地学分析的新方法,累计坡谱曲线能较直观的反映出 DEM 提取坡度的误差大小。

(4) 本研究的采样数据还不够充分,可以在合适的区域(如一个特定的小流域)采集更多的样点进行分析;缺少高精度 DEM 或大比例尺地形图提取的坡度与实测坡度的研究,如 10 m 以下 DEM 分辨率或 1∶1万以上地形图;还需对不同地貌类型进行研究;坡谱分析是新出现的地学分析方法,还需要更深入的研究。

[参 考 文 献]

[1] 汤国安,赵牡丹,曹涵. DEM 地形描述误差空间结构分析[J]. 西北大学学报:自然科学版,2000,20(4):349-352.

[2] 汤国安,龚健雅,陈正江等. 数字高程模型地形描述精度量化模拟研究[J]. 测绘学报,2001,30(4):361-365.

[3] Andy J, Jorge R, Andy N, et al. Practical use of SRTM data in the tropics : Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data[OL]. (2004-02-03)[2004-05-26]. http://srtm.csi.cgiar.org/PDF/Jarvis4.pdf.

[4] 闫业超,张树文,岳书平. 东北川岗地形区 SRTM 数据质量评价[J]. 中国科学院研究生院学报,2008,25(1):41-46.

[5] 汤国安,杨勤科,张勇,等. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究:以黄土丘陵沟壑区的实验为例[J]. 水土保持通报,2001,21(1):53-56.

[6] 赵牡丹,陈正江,晋锐. DEM 提取地面平均坡度误差的量化模型[J]. 水土保持通报,2002,22(03):55-57.

[7] 汤国安,宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报,2006,20(02):157-160.

[8] 刘俊娥,王占礼,袁殷,等. 黄土坡面薄层流侵蚀过程实验研究[J]. 水土保持通报,2010,30(3):27-30.

[9] George C M, Charalampos V E. Vertical accuracy of the SRTM DEM level 1 of crete[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 7(1):49-59.

[10] ASTER GDEM Validation Team. METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. ASTER Global DEM Validation Summary Report[OL]. (2009-06-23)[2010-03-02]. https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/aster_products_table/routine/global_digital_elevation_model/v1/astgtm.

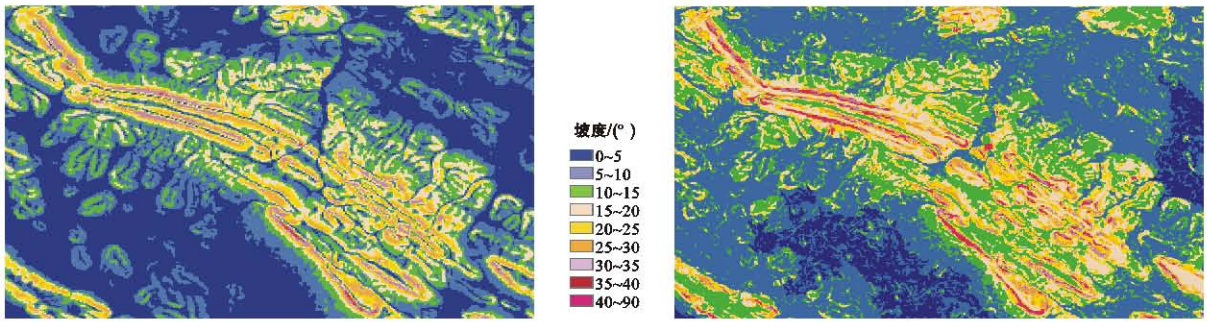
[11] 汤国安,刘学军,闾国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2006:188-189.

[12] 刘学军,汤国安. 数字地形分析:机遇与挑战[J]. 地理信息世界,2009(1):6-7.

[13] Tang G A, Josef Strobl, Gong J Y. Elevation on the accuracy of digital elevation models[J]. Journal of Geographical Sciences, 2001,11(2):209-216.

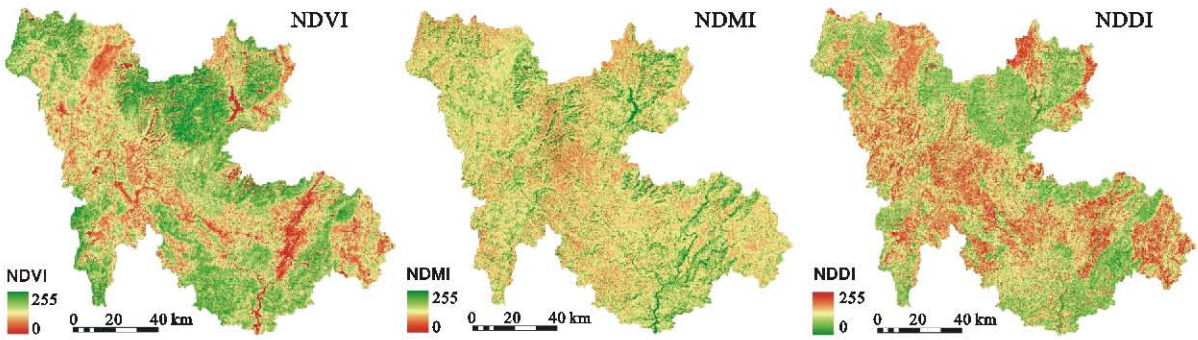
[14] 王春,汤国安,李发源,等. 基于 DEM 提取坡谱信息的不确定性[J]. 地球信息科学,2008,10(4):539-544.

[15] 杨勤科,贾大韦,李锐,等. 基于 DEM 的坡度研究:现状与展望[J]. 水土保持通报,2007,27(1):146-150.

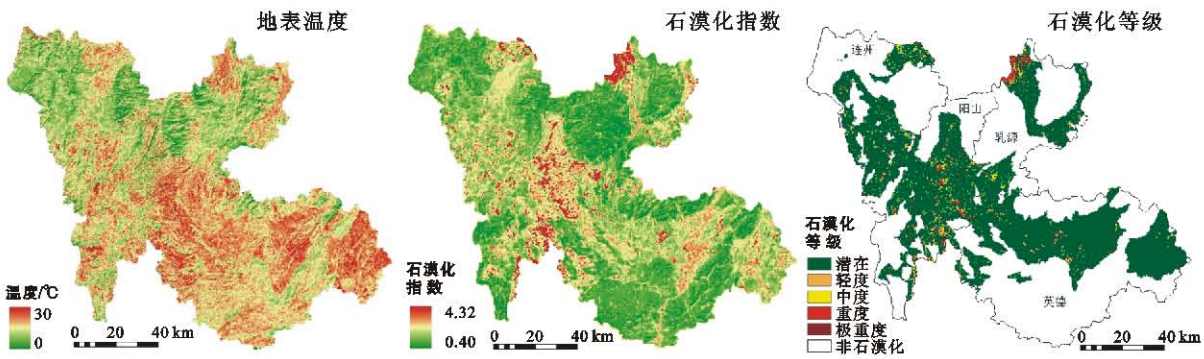


航天飞机雷达地形测绘(SRTM)　　先进星载热和反辐射仪全球数字高程模型(GDEM)

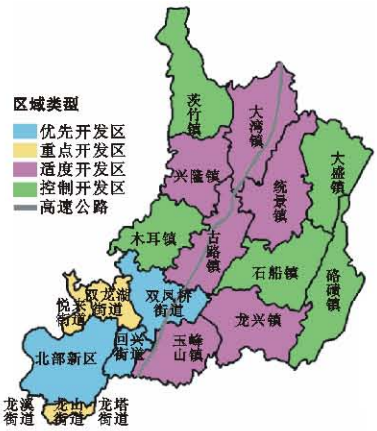
附图1　藏北地区SRTM和GDEM局部坡度图



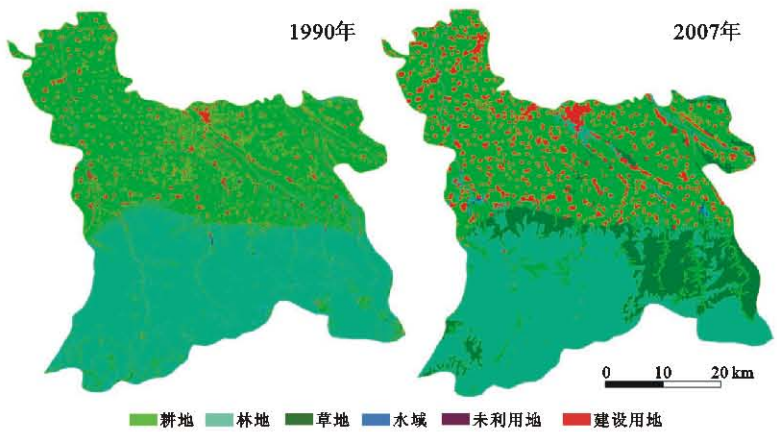
附图2　粤北典型岩溶区归一化植被指数(NDVI)、归一化湿度指数(NDMI)和归一化退化指数(NDDI)空间分布



附图3　粤北典型岩溶区地表温度、石漠化指数与石漠化等级空间分布



附图4　基于BP的重庆市渝北区主体功能分区



附图5　西安市长安区1990和2007年土地利用/覆被遥感解译图