

文章编号: 1007-4619(2005)01-0087-06

遥感影像的古长城信息提取方法研究

尹 宁^{1, 2}, 王长林^{1, 2}, 聂跃平^{1, 2}, 杨 林^{1, 3}

(1. 中国科学院、教育部、国家文物局遥感考古联合实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;

3. 中国国家博物馆, 北京 100006)

摘 要: 从分析古长城的遥感信息机理及其光谱特征入手, 发现陕北榆林地区古长城与沙地、道路的光谱特性极其相似, 因此用单一的阈值法很难将古长城信息提取出来。在综合考虑古长城的空间几何特性(包括形状、大小等)及其在遥感影像上的光谱表现特征的基础上, 提出了灰度坡度法对古长城信息进行提取, 即利用古长城在 IKONOS 图像上仅有 1—2 个像元宽, 且与背景地物的灰度差较大的特征, 把它与沙地和道路分离出来。运用这一方法并结合光谱阈值分析, 从图像上进行了明代长城的提取, 取得了较满意的效果, 并为进一步的长城考古研究和遥感图像信息提取提供了参考。

关键词: 古长城; 遥感; 信息提取; 灰度坡度

中图分类号: TP722.6/TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

长城作为古代社会最宏伟、持续修筑时间最长、最系统的军事防御工程, 在中国有着 2000 多年的悠久历史。长城在考古研究中占有重要的地位。

在古长城的研究中, 如果有不同时期、不同地区的长城的空间分布信息, 就可以比较容易地对各个历史时期长城的修筑、分布与走向, 长城的功能与作用, 长城与古代民族关系, 长城沿线的屯垦, 长城沿线的环境变迁等问题^[1]进行深入地探讨和研究。因此, 快速、准确、客观地提取古长城信息, 获得不同时期、不同地区古长城的分布范围, 就成为古长城研究中的一个关键问题。

长城的分布地区广泛, 往往穿越多个城市, 还有一些历史时期的长城经过“岁月的洗礼”, 已经变得残破不堪, 更有一些已经湮没在无边无际的沙漠之中, 用传统的考古学方法进行研究, 耗时耗力, 而且很难对长城的周边环境、历史变迁、历史作用等有一个宏观的、全面系统的认知。因此, 将遥感技术用于长城的研究, 成为了一个必然的趋势。

利用遥感对长城进行研究, 本文并不是首次。

国土资源地质遥感中心于 1987 年在北京地区开展了长城航空遥感调查, 并于 1990—1992 年对宁夏境内长城状况做了较详细的航空遥感工作^[2]。1994 年中国科学院遥感应用研究所利用航天飞机成像雷达 SIR-C/X-SAR 探测到位于宁夏盐池到陕西定边的古长城。航天飞机在这个地区平行于长城飞行, 雷达波垂直于城墙发射, 形成的角反射器效应使得雷达能够有效地识别长城。在干沙覆盖地区, 由于雷达的穿透能力, 长城被完整地显示在 SAR 图像上, 其中波段与极化在探测长城时起了重要作用^[3, 4]。本文主要是采用高分辨率卫星数据, 利用长城分布的空间及波谱特征, 对古长城信息进行识别。

遥感专题信息的提取, 如水体、居民地、道路、地质构造等信息的提取, 近几年得到了广泛的研究, 并提出了阈值法、差值法、密度分割法、谱间关系法以及基于专家知识等信息提取方法^[5]。将遥感技术应用于考古信息的提取, 是一个崭新的研究领域, 本文针对这一现状, 在借鉴前人研究成果的基础上, 尝试通过对长城及其背景的光谱及遥感信息机理分析, 探索一种快速从高分辨率的 IKONOS 影像上提取古长城信息的方法, 并结合实例对这一方法进行了验证, 取得了较满意的结果。

收稿日期: 2003-07-14; 修订日期: 2003-10-24

基金项目: 中国科学院遥感应用研究所知识创新工程重大项目(CX0800H)资助 Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 尹宁(1978—), 女, 2001年毕业于南京大学城市与资源学系, 获理学学士学位。现为中国科学院遥感应用研究所在职硕士研究生, 主要从事遥感考古方面的研究工作, 已发表论文 1 篇。

2 研究区及数据概况

研究区位于陕西省北部的榆林市,该研究区内有水体、耕地、林地、沙地、城镇用地、道路等,大部分土地沙化比较严重。长城从研究区的东北角穿过,出露于镇北台以东的一片沙漠地区,风化程度较高,地表上仅存有高约 1m 左右的城墙,较好的高有 2m 多,有些地方损毁比较严重,无城墙出露,仅存土埂状残迹。城墙附近有植被覆盖(图 1)。

所使用的数据是 2001-07-15 获取的 IKONOS 多波段图像,空间分辨率为 4m,包括 4 个波段,分别为蓝波段(0.45—0.52 μm)、绿波段(0.52—0.60 μm)、红波段(0.63—0.69 μm)、近红外波段(0.76—0.90 μm)。为了研究方便,在图像右上角选取 700 \times 250 大小的子图像做研究。



图 1 研究区长城照片

Fig. 1 The picture of Great Wall

3 古长城识别的基本原理及方法

3.1 长城的遥感机理分析

多光谱卫星遥感影像记载了地物对电磁波的反射信息及地物本身的热辐射信息,不同地物由于其结构、组成及理化性质的差别,导致其对电磁波的反射及本身的热辐射存在着差异^[6]。研究区内的长城经考古验证为明代长城,主要为黄土夯筑。由于该地的土地沙化比较严重,残存的长城实际上只剩下一道土垛,在图像上与沙地混杂在一起。对于沙质

土壤,其反射率一般是随着波长的增加而增加,并且此趋势在可见光和近红外波段尤为明显。因此,沙质土壤的反射率在可见光的红、绿波段明显增大,在彩色图像上表现为亮色调,尤其在绿波段,沙土的反射率明显高于其它波段。而植被和水体在这两个波段内的吸收能量比较大,反射率较小,这使得沙地在这两个波段上与植被和水体有着明显的区别。反映在影像上,植被和水体呈现出暗色调,而沙质土壤则相对较亮^[7]。因此,在红、绿波段选用合适的阈值,将高于该值的像元定为沙地,低于该值的则为非沙地,这样就可以很容易地把沙地与其它地物区分开来。

但是由于古长城受损比较严重,残存的城墙湮没在沙地中,其光谱特征与沙地及一些土路十分相似,在图像上呈现出近乎相同的亮色调,若仅仅使用阈值法,则提取的长城混在大片的沙地中,因此阈值法无法有效地提取出露于沙地中古长城。在空间上,长城主要呈现折线状,并且宽度较小,为线状地物,其两侧由于近期治沙绿化取得一定的成效,有一些植被覆盖;而沙地的分布面积较大,为面状地物,表现在遥感图像上,长城与其周围的背景地物的灰度差较沙地的要大得多。因此,可以利用这一点并结合光谱阈值将长城、道路和沙地三者分离开来,这也是本文研究的主要内容。

3.2 IKONOS 影像长城及背景地物的光谱值分析

为了分析长城及其背景地物在 IKONOS 影像上的光谱特征,在经过增强处理的图像上,选取几种典型地物,对每一种地物各个波段的光谱亮度值,进行样本统计,统计结果见表 1,并用地物的各波段均值作出波谱响应曲线,如图 2。

从表 1 和图 1 可以直观地看出,古长城、道路和沙地这三种地物(图 2 上用粗线表示)在 4 个波段的波谱响应基本一致,而与其它地物有较大的区别。在 1 波段这 3 种地物与居民地混淆较大,但在 2、3、4 波段,它们的值均比其它地物高,且变化呈上升趋势,这种差别表现得更为明显。因此,用单一的阈值分类法无法将长城提取出来,所以考虑首先将这 3 种地物作为一个整体(合称为“沙质地物”),与其他地物区分开来,再根据其他的辅助特征对这 3 种地物进行分别提取。

表 1 典型地物采样点波谱亮度值统计结果

Table 1 The statistical results of typical object samples' spectral values

		古长城	道路	沙地	水体	居民地	植被
Band1 (B)	最小值	22	27	24	4	20	5
	最大值	40	49	37	11	72	15
	均 值	32	40	33	7	35	10
	均方差	4	5	2	2	7	3
Band2 (G)	最小值	39	43	45	9	26	10
	最大值	69	81	67	18	92	23
	均 值	54	65	59	13	47	17
	均方差	7	7	4	2	10	4
Band3 (R)	最小值	50	49	57	3	28	8
	最大值	87	95	94	14	89	20
	均 值	70	79	78	7	50	14
	均方差	9	9	6	3	10	3
Band4 (NIR)	最小值	59	72	72	0	22	77
	最大值	98	108	109	12	84	144
	均 值	81	91	87	4	49	104
	均方差	8	7	5	2	16	20

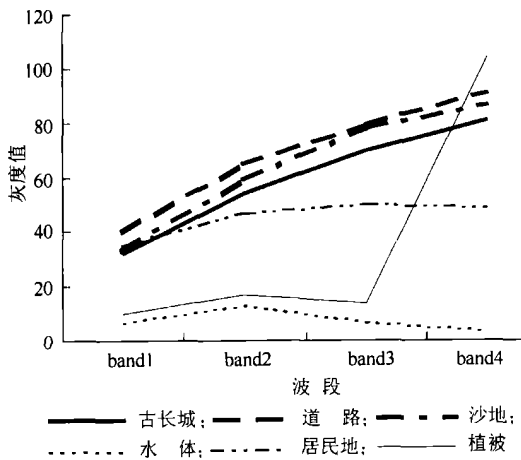


图 2 典型地物波谱响应曲线

Fig. 2 The spectral response curves of typical objects

3.3 古长城的提取方法

根据上文有关长城的遥感机理及光谱特征分析,利用地物的光谱特征和辅助的空间特征,将古长城提取出来。

3.3.1 沙质地物的提取

根据沙质地物在红、绿波段(2、3波段)的亮度值明显高于其它地物,且红波段的亮度值大于绿波段的特点,比照植被提取中的归一化植被指数

(NDVI),利用红波段和绿波段的比值经标准化处理,得到归一化土壤指数(NDSI)^[8],即将沙质地物提取出来(沙质地物大于0,而其它地物小于0)。NDSI的表达式为:

$$NDSI = \frac{R - G}{R + G}$$

3.3.2 古长城的提取

从上面的波谱特性分析中可知,3种沙质地物的光谱响应基本一致,用简单的光谱阈值法无法将3种地物有效地区分出来,因此,借助于一些空间特征,来进行特征提取。

古长城残存的城墙,在地面上表现为有一定高度、一定宽度且不连续的折线形土垛,城墙两侧的沙地,由于治沙绿化取得一定的成效,有一些植被覆盖。考虑到IKONOS多波段影像的空间分辨率,长城在影像上只有1-2个像元宽,并且与周围的背景地物,主要是两侧的植被,光谱响应差别较大,表现在影像上灰度值有一定的突变;对于沙地和较宽的道路,同质区域范围较大,边缘的灰度变化比较缓慢(图3)。因此,利用这一空间特性将古长城提取出来。

在地形模型中,各点在高程上的变化率用平面坡度来表征,高程变化较大的地方,坡度值较大。从

中得到启发后发现,在坡度计算中,只要将高程值换成灰度值,得出的就是灰度的变化率,在灰度变化较大的地方,此变化率就大,因此就可以很容易地将与周围地物灰度相差较大的长城从变化较缓慢的沙地和道路中分离出来。



图 3 IKONOS 3,2,1 波段真彩色合成影像

Fig.3 Color composition image of IKONOS 3,2,1 band

定义两个经过 p 点的向量 V_1, V_2 :

$$V_1(dx, 0, dzx) = (2 \times PX(1), 0, (bz - \alpha) \times EL) \text{ (x 方向)}$$

$$V_2(0, dy, dzy) = (0.2 \times PX(2), (\alpha - dz) \times EL) \text{ (y 方向)}$$

其中, dzx 和 dzy 是两个像元间灰度的变化值, dx 、 dy 是像元间的投影距离, PX 、 EL 分别是像元的地面大小和灰度的变化步长。

法向量

$$N(nx, ny, nz) = V_1 \times V_2 = (-dy * dzx, -dx * dzy, dx * dy)$$

则灰度的变化率(即灰度的坡度)($0^\circ - 90^\circ$)为

$$slope = \arccos\left(\frac{nz}{\sqrt{nx^2 + ny^2 + nz^2}}\right)$$

(2) 长城的提取

根据上文的方法,还可以计算出灰度变化的坡

(1) 灰度变化率的计算

如图 3 所示,对于图像上任意一个像元 $p(px, py, pz)$ (这里 pz 不是高程值,而是该像元的灰度值),其相邻的 4 个像元分别是 $a(px, py - 1, \alpha)$, $b(px - 1, py, bz) \dots$

向($0^\circ - 360^\circ$),作为长城提取的辅助信息。

$$Aspect = \arctan\left(\frac{ny}{nx}\right)$$

通过直方图分析,选用灰度分布较均匀的第 4 波段对第 1 次所提取的沙质地物计算灰度坡度和坡向。经采样分析可知长城的灰度坡度大于 58° , 小于 73° ; 坡向(灰度变化的方向)大于 310° , 小于 355° , 取阈值进行判别,可以将古长城提出,但有一部分并非长城,而是较窄的道路及沙丘与阴影的交界(图 4)。

(3) 道路的去掉

为了将所提长城图像中的道路去掉,在原图像中对长城及道路再采样(各采 10 个样点),分析它们在 4 个波段的波谱特性,长城与道路的亮度值如图 5 所示。



图 4 用灰度坡度法提取的长城

Fig.4 The Great Wall segment extracted using gray-slope method

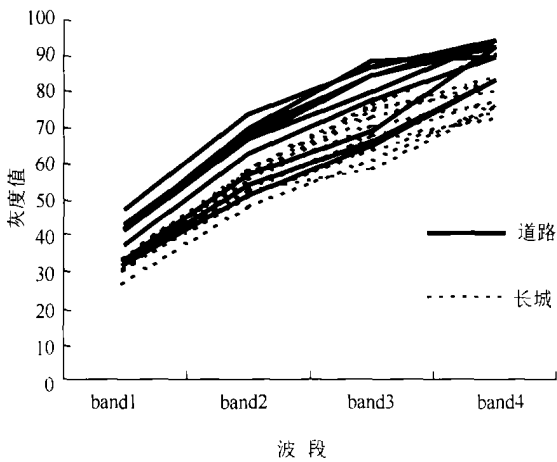


图5 长城与道路的波谱响应曲线

Fig.5 The spectral response curves of Great Wall and road

从图中可以看出,两种地物的混淆程度比较大,但综合4个波段进行阈值判别,可以将道路与长城分别开来(但又与别的地物有混淆),因此首先利用光谱阈值将道路提取出来,然后在用灰度坡度法得到的图像的基础上,可以将道路的影响去除。阈值的选择准则:

$$32 \leq \text{band1} \leq 50;$$

$$55 \leq \text{band2} \leq 75;$$

$$65 \leq \text{band3} \leq 90;$$

$$85 \leq \text{band4} \leq 95。$$

这样,我们就可以得到较纯净的长城信息,如图6。



图6 去除道路后的长城

Fig.6 The Great Wall after discarding roads

4 结果与讨论

研究表明,在土地沙化比较严重的地区,残存的古长城混在沙地当中,单一的光谱分析无法将它有效地提取出来,本文通过将空间分布特性与光谱特性综合分析,提出了灰度坡度法,利用长城的空间特征在遥感影像上的灰度表现形式,并结合光谱阈值,能够将古长城信息比较有效地提取出来。

但从最后的结果图可以看出,除了长城还有少量其它的地物也被提取出来了,分析其原因,主要是沙丘与其阴影部分的边界光谱特征及其灰度变化与长城比较相似,没有被很好的分离出来。若在进行处理之前,先消除地形的影响,阴影部分的影响就会

大大减小。

关于灰度坡度法的普适性如何,能否推广到其他地区,还有待于在今后的工作中进一步检验,特别是古长城的空间特征及其在遥感图像上的表现特点,对于其他地区是否相同,也有待于进一步的研究。但是只要长城的空间特征有本文分析的特点,利用灰度坡度法就可以有效地将残存在的古长城信息提取出来,并为进一步的长城考古研究提供很好的基础资料。

参考文献 (References)

- [1] Li W L. The Four Developing Periods of Chinese Great Wall [J]. *Culture Relic Age*, 2001 (2). [李文龙. 中国古代长城的四个历史发展阶段[J]. *文物春秋*, 2001(2)]. <http://www.cnki.net>
- [2] Li F, Gu W, Gao C X. Aerial Remote Sensing Investigation for Great Wall in Ningxia [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1994,

- (3);7-17. [黎风, 顾巍, 曹灿霞. 宁夏长城航空遥感调查研究[J]. 国土资源遥感, 1994, 3;7-17.]
- [3] Guo Huadong. Radar for Earth Observation: Theory and Applications [M]. Beijing: Sciences Press, 2000. [郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [4] Parrinello T, Vsughan R A. Multifractal Analysis and Feature Extraction in Satellite Imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(9): 1799-1825.
- [5] Du J K, Huang Y S, Feng X Z, et al. Study on Water Bodies Extraction and Classification from SPOT Image [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(3): 214-219. [都金康, 黄永胜, 冯学智等. SPOT 卫星影像的水体提取方法及分类研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 214-219.]
- [6] Du Y Y, Zhou C H. Automatically Extracting Remote Sensing Information for Water Bodies [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(4): 265-269. [杜云艳, 周成虎. 水体遥感的信息自动提取方法[J]. 遥感学报, 1998, 2(4): 265-269].
- [7] Zhou C H, Luo J C, Yang X M, et al. Geographical Understanding and Applications of Remote Sensing Imagery [M]. Beijing: Sciences Press, 1999. [周成虎, 骆剑承, 杨晓梅等. 遥感影像地学理解与分析[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [8] Xu J C, Zhao Y S, Liu Z H. Research on Ecological Environment Chang of Middle and West Inner-Mongolia Region Using RS and GIS [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(2): 142-149. [徐建春, 赵英时, 刘振华. 利用遥感和 GIS 研究内蒙古中西部地区环境变化[J]. 遥感学报, 2002, 6(2): 142-149.]

Extraction of the Great Wall Information from Remote Sensing Imagery

YIN Ning^{1, 2}, WANG Chang-lin^{1, 2}, NIE Yue-ping^{1, 2}, YANG Lin^{1, 3}

(1. Joint Laboratory of Remote Sensing Archaeology, Beijing 100101, China;

2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. China National Museum, Beijing 100006, China)

Abstract: The famed Great Wall of China stretches some 3,000 kilometers (1,850 miles). High-resolution satellite remote sensing provides cheap and quick data resources for delineating the Great Wall. In this paper, the remote sensing mechanism and spectral characteristics of the Great Wall segment in remote sensing imagery were analyzed. Due to the similar spectral response feature of Great Wall to road and sand, threshold for bands is not an effective method for the extraction of Great Wall. Thus, A gray-slope algorithm is introduced, which can extract Great Wall information effectively and easily. Due to the extensive destroy to the Great Wall, it is only 1 or 2 pixels wide in IKONOS imagery. And the gray level between Great Wall and other objects around it is very different, that is, the change of gray level along Great Wall is greater than that of road and sand. Based on these two characteristics and bands threshold, the gray-slope method makes road and sand separated from the Great Wall easily. Yulin County in Shan'xi Province is selected as a case study area, and IKONOS imagery is used as a data source. The result is satisfied when this method is applied to identify the Ming Great Wall submerged in the Maowusu desert. However, the universality of this algorithm needs to be tested further in other areas as the spatial characteristics and spectral response of Great Wall may vary.

Key words: Great Wall; remote sensing; information extraction; gray-slope method