

分类号

密级

中国地质大学(北京)
专业硕士学位论文

矿山调查影像产品综合检验方法研究

研究生 王志晖 学 号 2112180004

学位类别 工程硕士 专业领域 测绘工程

校内导师 付宗堂 校外导师 汪洁

学习方式 全日制

2021 年 5 月

**A Dissertation Submitted to
China University of Geosciences for Master of Professional
Degree**

**Research on comprehensive inspection method of Raster
products**

Master Candidate: Zhihui Wang

Professional Degree: Surveying Engineering

Dissertation Supervisor: A.Prof.Zongtang Fu

Associate Supervisor:Jie Wang

China University of Geosciences (Beijing)

摘要

随着遥感技术的发展，国产高分辨率的遥感影像分辨率早已达到亚米级别，对遥感影像质量的要求也越来越高，相应的出现了对影像的质量的评价的各种方法。然而对于矿山遥感等对影像局部质量要求较高，对整体影像质量要求相对较少的领域，传统的影像质量的评价方法可能无法满足要求，可能出现影像整体的质量符合要求，但是影像局部关注区域的质量不合格的情况。因此找到一种评价影像局部质量的方法显得尤为重要，本文主要通过评价矿区的影像辐射精度、影像几何精度和色调一致性三个方面评价矿区内影像的质量，并根据评价结果提高矿区内影像的质量，通过具体实例证明了方法的有效性主要研究内容及结论如下：

(1) 提出了基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价方法，改进了传统的以整张影像为基准的评价方式，将影像分割并作为评价的基本单元，然后每个单元分别对选择的辐射校正精度的检验因子的计算，最后进行综合评价计算，得到影像细部的辐射校正精度的评价结果。结果表明基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价方法可以很好地反应影像细部地物和矿区内地物的辐射校正的质量，影像各区域的辐射校正精度在结果中通过不同的颜色直观的表示，可以为评价影像细部和矿区内部影像的质量提供参考。

(2) 提出了一种提高矿区几何校正精度的方法，矿区内的几何校正精度受各种因素的影响往往较低，本文通过计算影像几何校正误差的全局莫兰指数和局部莫兰指数，计算出了影像的几何校正误差的分布情况并且找到了影像几何校正误差较大且分布相关性较强的区域，然后结合地形对几何校正的影响，重新调整几何校正精度较低的区域内的几何校正控制点的数量和分布，再进行几何精校正，从而达到提高矿区内的几何校正精度并且不影响影像整体的几何校正精度的目的。改进了传统的为了提高影像矿区内的几何校正精度。

(3) 提出了一种通过判断影像矿区地物色调一致性的方法，通过统计检验区域内所有同种矿山地物的灰度均值，计算所有同类地物的灰度均值中误差，然后根据灰度均值中误差设置极限误差，通过地物灰度均值一倍中误差和两倍中误差分别完成对矿山地物的检验，为矿山地物的选择使用提供指导。

关键词：辐射校正精度，几何校正精度，矿山调查，色调一致性

Abstract

With the development of remote sensing technology, domestic high resolution remote sensing image resolution has already reached sub-meter level, widely used in agriculture, forestry, geological survey, urban planning and other fields, the quality of remote sensing image requirements are becoming higher and higher, corresponding to the emergence of the evaluation of image quality of various methods. However, for mine remote sensing and other fields that have high requirements for local image quality but relatively few requirements for overall image quality, traditional image quality evaluation methods may not meet the requirements. There may be a situation that the overall quality of the image meets the requirements, but the quality of the local area of concern of the image is not qualified. Therefore, it is particularly important to find a method to evaluate the local quality of images. In this paper, the quality of images in the mining area is evaluated mainly through the evaluation of the radiation accuracy and the geometric correction accuracy, and the quality of images in the mining area is improved according to the evaluation results. The main research contents and conclusions are as follows:

(1)An evaluation method for radiometric correction accuracy of remote sensing images based on PixelBlock segmentation is proposed, which improves the traditional evaluation method based on the whole image, and takes the image segmentation as the basic unit of evaluation. Then, each unit calculates the test factors of selected radiometric correction accuracy respectively, and finally carries out comprehensive evaluation calculation. The evaluation results of radiometric correction accuracy of image details are obtained. Results show that the remote sensing image radiation correction based on PixelBlock segmentation accuracy evaluation method is a good way to response the image detail feature and the quality of the mining area of mainland radiation correction, the correction precision of image regions of radiation in the results by different color intuitive said, for the assessment of the quality of image detail and mine the internal image to provide the reference.

(2)Put forward a method to improve mining area the precision of geometric correction, geometric correction accuracy within the mining area is affected by various factors tend to be low, in this paper, through calculating the image geometric correction error global moran and local moran index, calculated the image the distribution of the geometric correction of errors and finding the image geometric correction error is bigger and stronger regional distribution correlation, Then,

according to the influence of terrain on geometric correction, the number and distribution of geometric correction control points in areas with low geometric correction accuracy are adjusted, and geometric precision correction is carried out, so as to achieve the purpose of improving the geometric correction accuracy in mining areas without affecting the geometric correction accuracy of the whole image. The traditional geometric correction method is improved in order to improve the accuracy of image mining area.

(3) A feature tonal consistency method by judging the image mining area, through all the same mine feature of statistical test area grayscale average, calculation error in the grayscale average of all the similar features, and then based on the grayscale average error is set limit, through feature in the grayscale average double error and error respectively in two times to complete inspection for mine terrain, It provides guidance for the selection and use of mine features.

Key words: Radiometric correction accuracy, Geometric correction accuracy, Mine investigation, Tonal consistency

目 录

摘要	1
Abstract	2
1 引言	1
1.1 选题背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 几何精度评价	2
1.2.2 辐射精度评价	2
1.3 研究内容与目的	4
1.3.1 研究内容	4
1.3.2 论文结构	4
1.3.3 技术路线	5
2 辐射校正与几何校正精度模型	6
2.1 辐射校正模型	6
2.1.1 辐射定标	6
2.1.2 大气校正	6
2.1.3 太阳高度和地形校正	7
2.2 几何校正模型	8
2.2.1 产生几何变形的原因	8
2.2.2 系统几何校正	9
2.2.3 基于控制点的几何精校正	9
2.3 色调模型	11
2.3.1 灰度直方图	11
2.3.2 灰度均值	12
2.3.3 灰度均值方差	12
3 影像辐射精度评价	13
3.1 影像辐射精度评价因子	13
3.2 遥感影像辐射校正精度综合评价方法	16
3.2.1 基于支持向量机的影像辐射校正精度评价	16
3.2.2 影像辐射校正精度模糊综合评价法	16

3.3 基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价	17
3.4 实验结果及分析	18
3.4.1 研究区概况	18
3.4.2 数据	19
3.4.3 实验过程	20
3.4.4 实验结果分析	25
3.5 本章小结	33
4 影像几何精度评价	34
4.1 几何校正精度评价模型	34
4.1.1 点位中误差	34
4.1.2 均方根误差	35
4.1.3 全局莫兰指数 Moran's I	35
4.1.4 局部莫兰指数 Moran's I	36
4.2 提高矿区几何校正精度的方法	36
4.3 实验结果及分析	37
4.3.1 研究区概况	37
4.3.2 数据	37
4.3.3 实验过程	39
4.3.4 实验结果分析	44
4.4 本章小结	54
5 影像色调一致性评价	55
5.1 色调一致性评价模型	55
5.1.1 灰度均值中误差	55
5.1.2 灰度均值极限误差	55
5.2 矿区地物色调一致性评价方法	55
5.3 实验结果及分析	56
5.3.1 研究区概况	56
5.3.2 数据	56
5.3.3 实验过程	57
5.3.4 实验结果分析	58

5.4 本章小结	59
6 结论与展望	60
6.1 主要结论	60
6.2 创新点	61
6.3 不足与展望	61
参考文献	62
致谢	66

1 引言

1.1 选题背景与意义

近年来遥感科学技术发展迅速，国产遥感技术在高分辨率、光谱分辨率精细化等方面突飞猛进。作为我国研制的首颗空间分辨率优于 1 米的民用遥感卫星，高分二号等针对亚米级、大幅宽对地观测特点开展了相关的设计，通过工程研制，卫星综合效能、长寿命、高可靠技术得到提升，为高分辨率图像产品定量化应用奠定了基础，开启了高分辨率高精度遥感卫星技术发展方向^[1]。

通常运行中的传感器收到传感器姿态变化、地形起伏、地球曲率、地球旋转等外部因素的影响，还受到传感器的装配误差、采样速率的变化、采样时刻的偏差等传感器内部因素的影响，还有影像处理过程中产生的噪声等等因素的影响往往我们无法直接使用原始影像进行生产利用。对此我们根据不同的需求分别对原始影像数据进行辐射校正、系统几何校正、几何精校正、高程校正最后得到不同的数据产品，使用数据时根据需求选择相应的校正产品。

常用的几何校正模型有多项式模型、有理函数模型（PRC 模型）以及严格的物理模型，常用的得几何校正方法在选择地面控制点时要求地面控制点在整幅校正的影响上均匀分布，传统的几何校正精度的评价一般都是评价控制点的点位中误差、均方根误差，控制点在总体的分布。但是在某些特殊的领域如矿山遥感，对矿山局部的精度要求极高，对影像整体精度要求则较低的需求，不同地形分区中的矿区中控制点的分布就显得尤为重要。

遥感影像进行完辐射校正后，传统的评价辐射校正质量的方式通过专家打分结合层次分析法（AHP）但是传统的方式包含着很多主观因素的影响，很大程度上受到评价人的专业素质的影响，无法客观的反应影像的辐射校正精度问题，而且评价的对象往往是整张影像无法反映影像细部辐射误差的不均匀性，对于矿山遥感的辐射精度的评价往往过于粗糙。

目前对于辐射校正精度和几何校正精度的检验大多停留在理论模型研究阶段，在日常生产实践中没有对投入生产的遥感影像进行规范的辐射校正精度和几何校正精度评定的方法，多数都是利用 ArcGIS、ENVI 等专业软件进行进行某一项内容的计算，非常浪费时间，浪费人力资源，对从业人员的专业知识要求也相对较高，需要一个专业的检验系统来解决上述的问题。

因此，找到一种适合矿山遥感区域性的几何校正精度评价和辐射校正精度评价的综合评价方法显得尤为重要。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 几何精度评价

姜春山等人,选取几何校正后用作基础性地理国情监测的高分二号遥感影像,计算布设的检查点与同名像点残差,绘制残差分布图对几何校正精度进行评价,同时引入空间自相关系数 Moran's I 指数评价检查点残差的空间随机性^[2];张亚妮等人,通过优化有理函数模型(rational function model,RFM),分别对资源三号(ZY-3)和 Pléiades 卫星高分辨率遥感影像进行几何校正,比较了不同数量地面控制点情境下几何精度提升的效果,并对二者的校正结果进行对比^[3];陶万成等人研究表明,遥感影像几何校正精度和地面分辨率呈正相关关系;随着选取地面控制点精度的提高,高分辨率影像几何校正精度也会得到相应提高,而中低分辨率的遥感影像几何校正精度提高程度并不明显^[4];在采用多项式模型进行遥感影像的几何精校正中,控制点的选取对校正精度有重要影响。陈光洲通过实例计算,分析比较控制点的数量、分布对校正结果的影响,分析结果表明:适当增加控制点的数量会提高校正精度,但控制点数量并非越多越好;选择均匀分布的控制点有利于提高几何校正的精度^[5]。

Nguyen Thanh 提出了一种基于遗传进化算法的 GCP 选择优化方法,通过在图像空间的每一点上计算变换的全局几何校正精度,提出了一种最优的几何校正精度评估准则^[27];Zhu Q 等人研究了不同地貌特征的 TH-1 影像基于多项式模型和有理函数模型的几何校正精度,以及在每种模型下不同控制点个数与几何校正精度的关系^[28];Gill T 等人提到了遥感影像的几何校正精度通常只使用均方根误差(RMSE)进行精度评估,然而, RMSE 是一种非空间测量方法,需要进一步研究开发几何校正自动空间显式精度评估方法^[29];Sertel E 等人引用了图形条件法来分析几何校正的精度,研究表明,该方法可以在不使用检查点的情况下获得整个研究区的误差值^[30];Takashi NONAKA 等人根据 DEM 高程误差引起的距离方向几何误差的简单模型,建立了利用入射角参数估计几何精度的模型,可以在一定的精度下估算地形校正数据的几何精度^[31];Liu Z 等人提出了一种定位几何校正算法,对虚拟椭球模型、高程误差和大气传输延迟等定位误差源进行了校正^[32]。

1.2.2 辐射精度评价

白穆等人,从影像辐射质量和影像实际应用两个方面,对资源三号卫星影像数据的质量进行了评价与分析。影像辐射质量评价从辐射精度、信息量、清晰度、信噪比和纹理特征等方面进行,通过对比相近时相的 ALOS 卫星数据,结果显示资源三号卫星数据优于

ALOS 卫星数据^[6]；魏宏伟等人，利用主观质量评价和客观质量评价两种图像质量评价方法，对两种传感器的遥感影像进行了对比评价。主观质量评价方法选取清晰度、反差、地物识别度、地面分解力 4 个评价指标；客观质量评价方法选取了辐射精度、清晰度、信息量、信噪比、地面分解力 5 个数据质量评价指标^[7]；王荣彬等人，针对传统的遥感影像辐射质量评价方法是以人工定性评价为主、缺乏客观和易行的定量评价标准，以及一些客观评价方法大多是从影像辐射质量的某一方面进行考察，不能全面综合地评定遥感影像的辐射质量的问题，总结了基于参考影像的评价方法、多指标综合评价方法^[8]；刘飒等人，研究了一种利用质量相关因素来评价遥感影像辐射质量的度量模型。该模型提取遥感影像的四个因素指标，即亮度、清晰度、信息量和纹理特征，采用相关分析法计算各个因素指标的权值。对于清晰度指标，通过改进梯度函数，研究了新的清晰度提取方法^[9]；杨帆等人，从信息量、清晰度、灰度分布 3 个方面选择了 10 个评价指标作为影像特征，利用支持向量机监督学习的方法对以资源三号为例的遥感影像的辐射质量进行评价及结果分析。试验结果表明，本文方法得到的评价结果与人工评价结果较为一致，准确度较高，并且自动化程度高，可应用于遥感影像的辐射质量评价^[10]。

Ahmet M. Eskicioglu 等人通过选择了归一化均方误差、最小平方误差等 14 个图像质量评价因子对图像的综合质量进行评价^[18]；Dewa 等人对通过不同的辐射校正方法得到不同辐射校正精度的影像应用于，进行植被冠层冠层检验，证明了不同辐射校正精度对植被冠层的检验影响很大^[19]；Saad Merrouche 等人选定了十二个评价图像质量的评价因子，提出了适用于视差图准确性评估的客观质量度量方法^[20]；Sadou Besma 等人通过相关向量机（SVM）结合人主观对图像质量的评价，得到了新的图像质量评价方法，结果表明最后得到的结果优于主观评价^[21]；Patrick Kenny 等人研究出了一种新型的定量评价图像质量的量化算法，改对图像处理的质量（包括边缘增强）更敏感，结果得到的阈值指数曲线，可以较为可观的评价图像质量^[22]；Popowicz 等人通过 36 种评价图像质量的模型对地面观测的太阳的图像质量进行评价，并对模型质量进行了分析^[23]；Ghareeb 等人提出了一种基于直觉模糊集理论的度量图像质量的算法，很好的解决了传统的图像质量量化评价结果与人的主观感觉不匹配的问题^[24]；Sinno Z 等人构建了一个关于嵌入移动流媒体应用程序，实现了图像质量的主观评价和客观评价相结合^[25]；Panetta, K 等人提出了一种采用差分最大滤波器对输入图像的灰度差、亮度、色彩等图像质量评价因子进行处理计算作为图像质量的评价指标。

1.3 研究内容与目的

1.3.1 研究内容

本文针对矿山遥感的特点，针对不同级别的遥感影像产品，在矿区内进行几何校正的误差计算研究、辐射校正的误差计算研究；并根据地形和控制点的分布绘制出影像几何误差分布图；通过分割影像并计算辐射校正精度特征值，得出遥感影像的辐射校正精度图；通过不同辐射精度区域内相同矿山地物的色调来验证计算出的辐射校正精度的准确度。具体的研究内容如下：

(1) 对于经过辐射校正的影像，制定辐射校正精度特征值，首先计算整幅影像的特征值并根据各个特征值设定的阈值计算各个特征值的隶属度，然后通过模糊数学评价法对整幅影像的辐射校正精度做出客观评价。由于遥感影像辐射受地物的影像具有不均一性，可以将整幅影像分割成一个个 128×128 个像元的像素块进行细部的辐射校正精度评价，分别计算每个像素块内每个特征值的隶属度，得到整幅影像的辐射校正的精度图，从而可计算每个矿区内的辐射校正精度，通过基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价方法得到影像细部和矿区内的辐射校正精度结果，作为影像局部质量评价的参考。

(2) 对于经过辐射校正和几何精校正的影像，进行地面控制点的点位中误差和均方根误差的计算、计算地面控制点在整幅影像中的分布情况；利用高程信息计算整幅影像的坡度，由于矿山多分布在坡度较抖的区域，地面控制点的选取受到坡度影像较大，因此根据坡度大小对影像进行分类，不同分区内分别设定相应阈值，计算不同分区内的地面控制点的密度和分布情况，可以得到整幅影像的地面控制点分布分区图以及不同分区的均方根误差；通过提高矿区几何校正精度的方法，根据分析得到的几何校正误差分布情况，提高影像局部的几何校正精度。

(3) 对于经过正射校正后的影像，通过统计计算相同地物的灰度中误差的合格率，来检验影像同类地物的色调是否符合要求从而判断影像中的某类地物是否可以投入生产供计算使用。

1.3.2 论文结构

本论文的组织结构如下：

第 1 章介绍了本论文的选题背景和意义还有几何精度评价和辐射精度评价的国内外研究现状以及本论文的研究内容与目的。

第 2 章介绍了常用的几何校正和辐射校正的模型，以及影像色调的判断方法。

第 3 章介绍了影像辐射精度的评价因子、评价方法以及提出了一种基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价方法改进了评价精度，并进行了实验对结果进行了分析。

第 4 章介绍了影像几何精度评价的评价模型以及提出了一种提高矿区几何校正精度的方法改进了矿区内的几何校正精度，并进行了实验对结果进行了分析。

第 5 章介绍了影像色调一致性的评价模型以及提出了一种基于地物灰度的影像色调一致性检验方法提高了矿区影像的可用性，并进行了实验对结果进行了分析。

第 6 章对整篇文章的实验结果进行总结分析并提出了不足与展望。

1.3.3 技术路线

根究研究的内容与目的，确定了本文的研究路线，如图 1-1 所示：

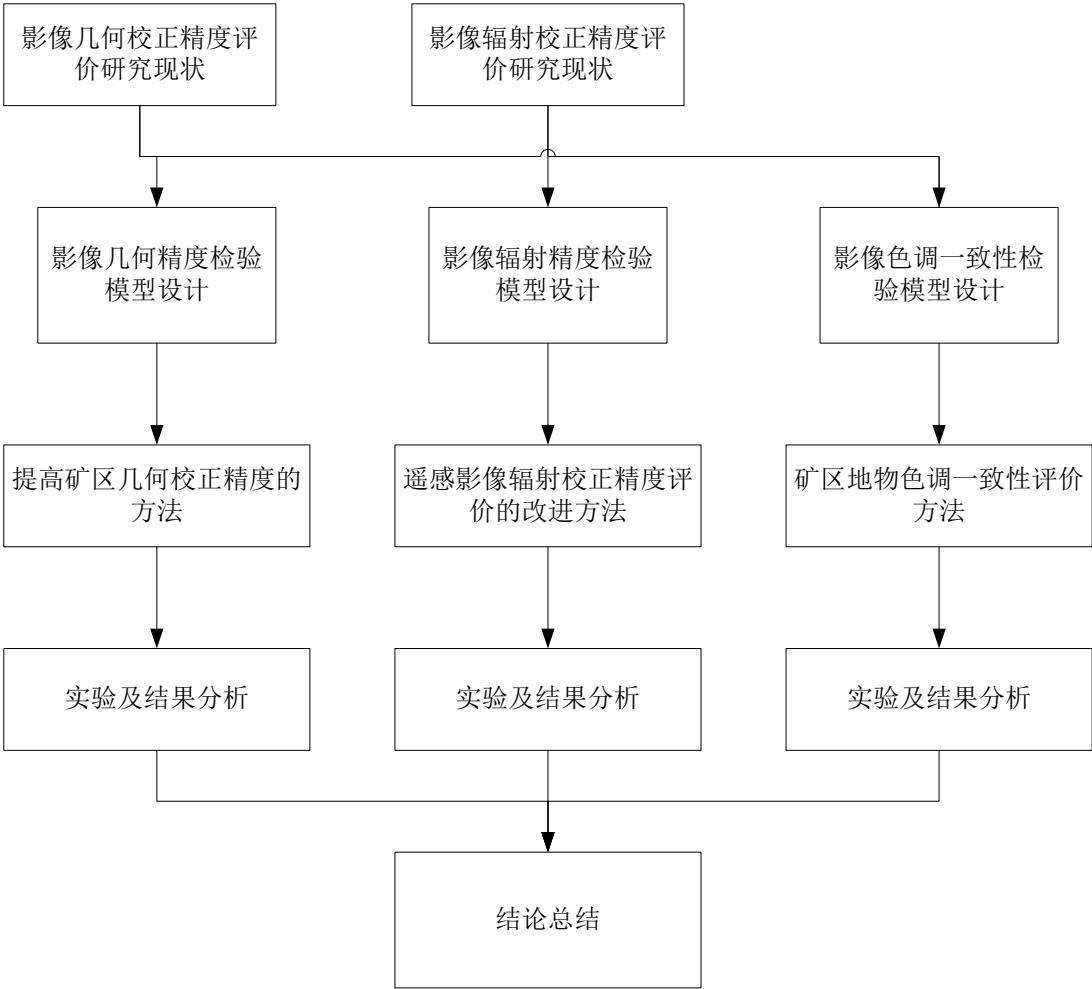


图 1-1 技术路线图

2 辐射校正与几何校正精度模型

2.1 辐射校正模型

太阳辐射强度被传感器接收后反映到遥感影像上就是灰度值，灰度值主要受两个因素影响，一个是太阳辐射强度的大小，另一个是地物反射率。影像上灰度值的差异直接反应地物反射率的不同。由于受到大气吸收与散射、传感器标定、太阳高度角、方位角、数据处理过程^[35]等因素的影响，往往影像上的灰度值无法直接反应地物真实的反射值，这时就需要辐射校正来减弱传感器和大气带来的影响。完整辐射校正的流程一般包括：辐射定标（传感器校正）、大气校正以及太阳高度和地形校正。

2.1.1 辐射定标

辐射定标是利用遥感图像进行大气信息和地表反射率反演的基础流程^[37]，是将传感器记录的灰度值转化为绝对辐射亮度值的过程，目的是消除传感器自身产生的误差。相对定标精度反映了各探元的响应特性^[38]，遥感传感器精确的辐射定标和几何定标是遥感信息量化的先决条件^[39]。有定标系数的卫星可以通过定标系数进行定标，没有定标系数的卫星可以通过精度较高的卫星进行交叉定标^[40]。灰度值与绝对辐射亮度值常用转化的公式：

$$L_{\lambda} = k \cdot DN + c \quad (2-1)$$

其中 L_{λ} 是 λ 波段的绝对辐射亮度值， DN 是像元亮度值， k 是增益量， c 是偏移量。

2.1.2 大气校正

由于卫星遥感传感器在获取信息过程中受到大气分子、气溶胶等大气成份吸收与散射的影响,数据的精度达不到定量分析的要求^[33]。定量遥感的目的是利用遥感器有效地收集来自地物的太阳辐射能量，从中反演陆地表面各种参数^[34]。电磁波在大气中的传输过程中受到各种因素影响，使得传感器的测量值与地物实际光谱辐射不一致^[36]。

大气校正就是为了消除大气和光照等影响因素对地物反射的影响，从而获取地物真实地表辐射值。大气校正的方法有：辐射传输模型法、线性回归模型法、基于图像特征相对校正法。

其中最常用的精度相对最高的就是辐射传输模型法，主要是根据电磁波在大气中的辐射传播原理建立模型进行大气校正的。常用的有：6S 模型、LOWTRAN 模型、MODTRAN 模型等。

（1）6S 模型

6S模型在 5S 模型的基础上发展起来的。该模型采用了最新近似(state of the art)和逐次

散射 SOS(successive orders of scattering)算法来计算散射和吸收,改进了模型的参数输入,使其更接近实际^[12]。6S模型创新的考虑的高程的影响和大气中不同气体种类的影响,大大的提高了模型精度。

(2) LOWTRAN 模型

LOWTRAN 模型是美国空军地球物理实验室研制的。目前流行的版本是 LOWTRAN7,它是以 20cm-1 的光谱分辨率的单参数带模式计算 0cm-1 到 50 000cm-1 的大气透过率,大气背景辐射,单次散射的光谱辐射亮度、太阳直射辐射度。LOWTRAN7 增加了多次散射的计算及新的带模式、臭氧和氧气在紫外波段的吸收参数^[12]。

(3) MORTRAN 模型

MORTRAN 模型是在 LOWTRAN 模型基础上开发的,它把光谱分辨率从 20cm-1 减少到 2cm-1,发展了一种 2cm-1 光谱分辨率的分子吸收的算法和更新了对分子吸收的气压温度关系的处理,同时维持 LOWTRAN7 的基本程序和使用结构^[12]。

2.1.3 太阳高度和地形校正

地球上山地面积占陆地面积的近三分之一,太阳辐射到达地面时受山地崎岖不平的地形影响,相同地物无法获得与平地相同的地表辐射值,从而容易造成“同物异谱”和“同谱异物”的现象,所以我们要进行地形校正。

目前,国内外已提出了不少地形校正模型,大致可以归纳为 3 大类,即基于波段比的方法、基于 DEM 的方法和基于超球面的方法。其中,基于 DEM 的校正方法又可以划分为 4 种类型:统计-经验模型、归一化模型、朗伯体反射率模型和非朗伯体反射率模型^[11]。

(1) 统计-经验模型

经验统计校正模型是一种基于图像的辐亮度和太阳入射角余弦值之间线性关系的经验校正模型:

$$L_m = L - m^\circ \cos i - b + \bar{L} \quad (2-2)$$

式中 L_m 表示像素校正后亮度值, L 表示像素校正前亮度值, \bar{L} 表示像素校正前亮度平均值, m 和 b 分别为回归方程的斜率和截距。

(2) 归一化模型

国外研究人员在余弦校正的基础上提出了二阶校正模型,经过一系列研究理论完善后这个方法被称为归一化模型。二阶校正模型为:

$$L_H = L_T + (L_T \times \frac{\mu_k - X}{\mu_k}) \times C \quad (2-3)$$

L_H 为二阶校正后像素亮度值, L_T 表示二阶校正前像素亮度值, μ_k 为阴影模型的平均值, X 为阴影模型中各像元的像元值, C 为二阶模型的修正系数。

(3) 朗伯体反射率模型

朗伯体反射率模型包括: Cosine-T 模型、Cosine-C 模型、Cosine-B 模型、C 模型、SCS 模型、SCS+C 模型……

(4) 非朗伯体反射率模型

Minnaert 校正模型属于典型的非朗伯体反射率模型, Minnaert 函数是由 Minnaert 在 1941 年提出的, Minnaert 常数 k 用来描述地表的二向性反射分布函数(BRDF)^[13], 模型为:

$$L(\lambda, S) = L_n(\lambda) \cos^{k(\lambda)} i \cos^{k(\lambda)-1} S \quad (2-3)$$

式中: L_n 为太阳在天顶时水平面像元所接收的辐亮度; L 为坡面像元所接收的辐亮度; S 为坡度; i 为太阳光线与坡面法线的夹角,也即太阳入射角。

2.2 几何校正模型

遥感影像经过辐射校正后使影像的亮度值接近于真实地物的反射值,但是没有解决像元大小与实际大小不对应、影像行列不规则、地物变形等问题,说明遥感影像是存在几何畸变的,需要进行几何校正。遥感图像在成像时,由于成像投影方式、传感器外方位元素变化、传感介质的不均匀、地球曲率、地形起伏、地球旋转等因素的影响,使得遥感图像存在一定的几何变形^[43]。消除这种畸变的处理过程就叫几何校正^[14]。

2.2.1 产生几何变形的原因

造成遥感影像的几何变形的影像因素包括静态误差和动态误差。静态误差是由于传感器成像时与地球保持相对静止时产生的误差,动态误差是由于地球自转导致的几何形变误差。

一般几何纠正都是纠正静态误差,静态误差可以分为内部误差和外部误差两种类型,内部误差就是由于传感器自身的结构影像带来的误差,由于传感器都是精密仪器经过严格的检验,一般影像的内部误差很小通常可以忽略不计。外部误差是排除传感器自身各种外部因素造成的误差,例如:传感器运动状态、地球自转、地形起伏、地球表面曲率、大气折射等。

(1) 传感器运动状态的影响

卫星围绕地球按椭圆轨道运动,引起卫星航高和飞行速度的变化,导致图像对应产生偏离与在卫星前进方向上的位置错动。另外,运动过程中卫星的偏航、翻滚和俯仰变化也能引

起图像的畸变^[14]。

（2）地球自转影响

由于地球自西向东旋转，所以非同步轨道卫星在运动时与地球存在相对运动，从而造成成像时卫星的星下位置产生偏离，从而产生几何形变。

（3）地形起伏影响

地球表面凹凸不平，由于地形起伏导致传感器成像的像点不在同一平面上，从而产生几何形变。

（4）地球表面曲率影响

地球表面是不规则的曲面,这使卫星影像成像时像点发生移动,像元对应于地面的宽度不等。特别是当传感器扫描角度较大时,影响更加突出^[14]。

（5）大气折射影响

大气层由对流层、平流层、中间层、热层、逃逸层构成，是一个非均匀的介质，密度随离地表高度的变化而变化，所以电磁波在大气中传播的折射率也随高度而变化，导致传输路径不是理想的直线而是曲线，进而引起了像点的位移，产生几何形变。

2.2.2 系统几何校正

系统几何校正也称为几何粗校正，几何粗校正的服务通常由卫星接收系统提供^[42]，主要为了消除传感器内部误差，不同类型不同型号的传感器根据其特性具有不同的校正公式，将已知的传感器的位置信息、姿态信息等参数传入校正公式中可以对传感器内部误差进行有效的改正，对与改正几何畸变有一定的效果。

2.2.3 基于控制点的几何精校正

当传感器位置、姿态参数无法获取是，或者影像经过系统几何校正，精度无法满足使用。这时就可以通过几何精校正的方法进行遥感影像相对于地面控制点的配准校正，在系统校正的基础上利用地面控制点(Ground Control Point,简称 GCP)的大地测量参数,修正系统校正模型,进而形成精确模型^[41]，计算遥感影像的坐标变换公式，从而获得较高的几何校正的精度，一般几何精校正的流程为首先在影像选择校正控制点，然后构建校正模型，最后再进行重采样内插。

（1）控制点选择

选择控制点的目的是影像建立待校正的控制点，与实际地面控制点、地形图量测的控制点的对应关系，可以直接在影像上寻找地面高精度控制点的影像对应点，当地面控制点

信息缺失时也可以直接量测地形图中和遥感影像上的地物特征点,如道路交叉点、河流交汇点、地物拐点等具有鲜明特征的点作为控制点。

(2) 构建校正模型

构建校正模型的目的是通过建立数学模型来表达遥感影像上的点与地面实际点的对应关系,根据采用的数学模型不同通常分为:多项式模型、有理函数模型(PRC模型)、严格的物理模型。

(a) 多项式模型

多项式校正不考虑空间成像的几何过程,直接对图像变形的本身进行数字模拟^[44],多项式模型几何校正是目前在实践应用中使用比较多的方法。他的模型为:

$$x = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} X^i Y^j \quad (2-4)$$

$$y = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} X^i Y^j \quad (2-5)$$

式中 x 、 y 影像像素点坐标, X 、 Y 是影像点对应地面点坐标, a 、 b 是多项式待定系数。

多项式模型忽略了地形起伏引起的影像变形,仅适合于地形起伏平缓地区的影像校正^[48]。

(b) 有理函数模型

有理函数模型是一种能获得与严格成像模型近似一致精度的、形式简单的概括模型^[50],是一个建立像素和地面位置对应关系的简单数学模型^[45],有理函数模型实际上是一种更广义、更完善的传感器模型表达方式^[47],校正精度近似于共线方程校正模型^[15]。模型公式为:

$$X = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} PLH}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p b_{ijk} PLH} \quad (2-6)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p c_{ijk} PLH}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p d_{ijk} PLH} \quad (2-7)$$

式中 P 、 L 、 H 是正则化后的地面坐标, X 、 Y 是正则化后的影像坐标, a 、 b 、 c 、 d 是多项式待定系数

(c) 严格的物理模型

目前,基于共线方程的严格物理模型被认为是几何校正精度最高的模型^[15]。是利用遥感影像的卫星轨道参数或者传感器参数及数字高程模、少量地面控制点进行纠正的方法模型^[46],公式为:

$$x_i = -f \frac{a_1(X_i - X_{S_i}) + b_1(Y_i - Y_{S_i}) + c_1(Z_i - Z_{S_i})}{a_3(X_i - X_{S_i}) + b_3(Y_i - Y_{S_i}) + c_3(Z_i - Z_{S_i})} \quad (2-8)$$

$$y_i = -f \frac{a_2(X_i - X_{S_i}) + b_2(Y_i - Y_{S_i}) + c_2(Z_i - Z_{S_i})}{a_4(X_i - X_{S_i}) + b_4(Y_i - Y_{S_i}) + c_4(Z_i - Z_{S_i})} \quad (2-8)$$

式中 X_i 、 Y_i 、 Z_i 表示控制点的地面坐标，在影像上的对应坐标为 x_i 、 y_i ， X_{S_i} 、 Y_{S_i} 、 Z_{S_i} 为传感器的外方位元素， a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 为传感器姿态角的相关函数

(3) 重采样内插

遥感影像原始影像行列均匀规则排列，每个像元亮度值对应每个像素点中心坐标，影像坐标均为整数行列值，由于进行完几何校正后和坐标变换后，像元重心点不再是整数，像元亮度值是原来影像坐标中不存在的亮度值，因此我们需要结合周边像元采用合适的数学模型计算出新的亮度值。常用的方法有：最邻近像元法、双线性内插法、双三次卷积法。

(1) 最邻近像元法

最邻近像元法的原理是将距离内插点最近的影像坐标点的亮度值直接赋给内插点，作为内插点新的亮度值。使用最邻近像元法具有简单、速度快的特点，但是容易造成地物的不连贯，许多情况下效果不理想。

(2) 双线性内插法

双线性内插法的原理是选取内插点临近四个像元的亮度值，根据四个像元中心距离内插点的距离作为权重，综合计算内插点亮度值。双线性内插法具有计算简单、精度较高的特点。对于一般地物的内插效果较好，对于地物边缘、细部的重采样可能误差较大。

(3) 双三次卷积法

双三次卷积法的原理是选取内插点临近十六个像元的亮度值，根据十六个像元中心距离内插点的距离作为权重，综合计算内插点亮度值。双三次卷积法具有精度高、内插效果好的特点，但是计算效率较低。

2.3 色调模型

遥感影像色调是指图像的相对明暗程度(相对亮度),在彩色图像上色调表现为颜色^[51]。在灰度图像上色调则表现为灰度值的差异。

色调是地物反射、辐射能量强弱在影像上的表现。地物的属性、几何形状、分布范围和规律都通过色调差异反映在遥感图像上^[51],色调差异是区分不同地物的重要特征。

2.3.1 灰度直方图

灰度直方图是关于灰度级分布的函数，是对图像中灰度级分布的统计，通过灰度直方

图可以反应图像的灰度分布情况，从而反应影像的色调特征。通过灰度直方图查看影像色调具有以下特征：

- (1) 灰度直方图只反应灰度分布情况不反应位置信息
- (2) 一幅影像对应一幅灰度直方图，不同的影像可以对应相同的灰度直方图

根据以上的特征在矿山遥感领域检验适合统计矿山区域内的灰度直方图然后对直方图进行比较从而检验某类地物是否色调符合标准。

2.3.2 灰度均值

灰度均值是指区域内所有像元灰度的平均值，公式为：

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^s g_i}{s} \quad (2-9)$$

式中 g_i 为第 i 个像元的灰度值， s 为像元总数。

由于通过灰度可以很好的反映影像的色调，所有在局部小区域内，如矿山开采面内，可以通过计算区域内的灰度均值来反映某类地物的色调，通过计算灰度均值的方式准确度较高，计算简便，解决了灰度直方图比较起来困难的问题，本文计算地物色调采取的就是计算灰度均值的方法。

2.3.3 灰度均值方差

灰度方差是指影像内所有同类地物灰度均值的方差，公式为；

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^n (\bar{g}_i - \bar{G})^2 \frac{1}{n} \quad (2-10)$$

式中 \bar{g}_i 为影像内某类地物中第 i 个地物的灰度均值， \bar{G} 为影像内某类地物的灰度均值， n 为影像内某类地物的数量。

通过计算灰度均值方差可以很好地衡量影像内同类地物的色调一致性差异。

3 影像辐射精度评价

遥感影像的获取过程中由于受到大气、地形等因素影响一般都需要进行辐射校正后投入生产使用，辐射校正的过程中必然会产生误差，这时就需要进行辐射校正精度评价工作。辐射校正精度的评价分为主观评价和客观评价两种，主观评价依靠专家知识或者专业从业人员经验对遥感影像经过目视判别后对其辐射校正质量进行打分，最后综合多人的打分结果作为遥感影像的辐射校正精度评定结果，这种评价方法受评价人的主观影响较大，评价结果往往不够客观；客观评价是根据辐射校正的原理，通过多个反应辐射校正质量的因子，每个因子通过相应的数学模型进行计算分析，得到每个因子的客观评价等级，最后通过相应的综合评价数学模型来获得辐射校正精度评定结果。本章采用的方法是客观评价方法，通过对国内外的研究现状的总结见表 3-1，分别对灰度分布、信息量、清晰度、噪声、云量、无效像元六个方面通过相应的数学模型分别进行量化评价，然后通过模糊数学综合评价法进行综合评价，最后提出了对整幅影像通过分割为 PixelBlock 对细部进行进一步的评价，从而改进矿山细部的辐射校正质量评价精度。

表 3-1 辐射校正评价因子使用统计

因子	使用者
信息量 ^[6]	白穆、魏宏伟、王荣彬、刘飒、杨帆
清晰度 ^[6]	白穆、魏宏伟、王荣彬、刘飒、杨帆
灰度分布 ^[8]	白穆、魏宏伟、王荣彬、刘飒、杨帆
噪声 ^[6]	白穆、魏宏伟、王荣彬
云量 ^[8]	白穆、王荣彬、杨帆
无效像元 ^[8]	白穆、王荣彬、刘飒
地面分解力 ^[7]	魏宏伟
纹理特征 ^[6]	白穆

3.1 影像辐射精度评价因子

(1) 信息量

遥感影像记录的是所有地物的反射亮度值，是遥感卫星对地观测的结果，遥感影像包含大量的信息，这些信息有有用信息还有有因为辐射校正过程中误差产生的无关信息。在日常数据使用中判断影像能提供多少有用的信息量对筛选影像至关重要，因此判断影像包含信息量的大小是判断影像辐射校正精度的一个很重要的因素。遥感影像的信息量可以用信息熵来度量，信息熵反映了影像全体亮度值的均匀程度和分散程度。为了方便计算将本文将原始影像转为灰度影像进行统一计算，影像信息熵的数学表达式为：

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (3-1)$$

式中, p_i 表示的是灰度级为 i 的像元出现频率

一般来说影像计算的信息熵 H 越大代表影像所包含的信息量越多。

(2) 灰度分布

遥感影像的灰度分布情况反映到遥感影像上就是遥感影像整体亮度的亮暗不同还有遥感影像整体对比度的大小不同, 在很多领域中例如矿山遥感领域, 由于使用遥感影像的灰度分布不同造成灰度分布不良的遥感影像中的相同地物的亮度值可能与真实地物的亮度值产生偏差, 出现“异物同谱”和“同物异谱”的现象, 从而导致误判, 因此利用合适的数学模型来度量遥感影像的灰度分布至关重要。一般可以通过计算各级灰度出现概率的均方差来衡量遥感影像的灰度分布, 为了方便计算将本文将原始影像转为灰度影像进行统一计算, 表达式为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^K (v_i - \frac{1}{K})^2} \quad (3-2)$$

式中 K 表示遥感影像的灰度分布级别, 由于本文计算使用的是灰度影像所以 K 的大小为 256, v_i 表示灰度级 i 出现的概率。

一般来说 σ 的数值越小, 代表灰度值分布越均匀, 遥感影像的灰度分布越好。

(3) 清晰度

清晰度原本是人对于遥感影像获取质量的主观评价, 其本质反应的是遥感影像边缘细节变化的灵敏程度。在矿山遥感中如果矿山地物的边缘像元的亮度值随位置变化的越剧烈, 那么反应的就是矿山的边缘越明显越容易被识别, 影像的清晰度相对来说也就越高。一般可以通过平均梯度法来量化遥感影像的清晰度。

平均梯度法具有计算简单效率高等优点, 一般可以采用 Roberts、Sobel 等算子计算影像的梯度, 对于离散影像 $g(i, j)$, 其一阶偏导数可采用一阶差分近似表示, 即 (i, j) 在处水平方向和垂直方向的梯度分别表示为^[8]:

$$g'_i = g(i+1, j) - g(i, j) \quad (3-3)$$

$$g'_j = g(i, j+1) - g(i, j) \quad (3-4)$$

则像元 (i, j) 的梯度可以表示为:

$$\text{grad}(i, j) = \sqrt{g_i'^2 + g_j'^2} \quad (3-5)$$

计算完所有像元的梯度后, 然后计算所有像元梯度的均值就可以得到遥感影像的平均梯度, 可以用遥感影像的平均梯度来定量衡量遥感影像的清晰度: 公式为:

$$\overline{grad} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n grad(i,j)}{m \times n} \quad (3-6)$$

式中 m 、 n 分别为遥感影像的行列数。

一般来说 \overline{grad} 的值越大，表示遥感影像的清晰度越高。

（4）噪声

遥感影像在成像、获取、影像传输、影像处理（如辐射校正）的过程中受到外界因素的影响，会产生各种各样的噪声，如压缩噪声和条带噪声等，对遥感影像的质量产生影响。在日常生产中，如矿山遥感中如果图像的噪声比较严重会影响到对矿山地物的判别，从而造成矿山地物的误判，会对生态环境造成不可估量的影响。所以将噪声作为量化辐射校正精度的指标至关重要。通过计算影像的逆变动系数可以对影像的噪声进行量化，公式为：

$$ICV = \frac{\bar{R}}{R_D} \quad (3-7)$$

式中 \bar{R} 为遥感影像的均值， R_D 为遥感影像的方差

如果对整幅影像做噪声评价可以将影像视为一个整体，但是这种方法往往对影像细部噪声评价效果一般，下文中提出了一种将影响分割并进行评价的方法有利于解决这方面的不足。

通常 ICV 的值越大表示影像受噪声的影响越小，影像的辐射校正精度也就越好

（5）云量

云是地球上水循环的有形的结果，广泛的存在于地球的每一个角落，在遥感影像的应用中，影像上云的存在会对地物直接产生压盖，直接降低了遥感影像的可用性，严重的会使影像直接无法使用。例如在矿山遥感中如果矿山地物的位置有云的压盖的话会直接影响到遥感地物的判读，严重的将导致无法完成云遮盖区域的判读工作。因此影像云量的检测对于量化遥感影像的辐射校正精度至关重要。常用的方法有云指数法、聚类分析法、纹理分析法等。阈值法通过选取影像的某个波段或者多个波段根据云层的亮度值或者反射率设定阈值然后通过筛选就可以确定影像云量的占比。

对于一幅遥感影像来说使用阈值法统计的云量是以一整幅影像为基础的，对于矿山遥感等对影像局部辐射校正精度要求比较严格的领域，可能无法满足精度要求，所以要对影像内部进行分割计算细部的云量占比从而达到精度要求。

（6）无效像元

无效像元大多数都是产生于几何校正或者是图像镶嵌后由于重采样的误差导致影像的四周或者图像衔接处出现没有值的情况，表现为像元值缺失导致无法通过像元亮度来判

断地物的属性。如果一幅遥感影像中无效像元的占比过大,直接导致多数地物亮度值缺失,直接降低了遥感影像的可用性。如果一幅影像的无效像元过多,则会直接影响到信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量等其他影响因素的计算。因此遥感影像的无效像元占比非常重要,反应了辐射校正精度的高低。

一般可以通过逐点比较像元亮度值或者阈值法来判断。本文通过阈值法设定无效像元的阈值通过筛选可以确定影像无效像元的占比。

3.2 遥感影像辐射校正精度综合评价方法

3.2.1 基于支持向量机的影像辐射校正精度评价

支持向量机(support vector machines, SVM)是建立在统计学习理论 VC 维理论和结构风险最小化原理基础上的机器学习方法^[16]。支持向量机巧妙地克服了维数灾难问题,成为解决有限样本情况下非线性问题的有效手段^[49],应用非常广泛。

基于支持向量机的影像辐射校正精度评价步骤大致如下:

(1) 选取一定量的遥感影像样本作为样本集和测试集,通过找专家进行主观评价作为样本的真实标签。

(2) 所有样本集和测试集中的影像分别计算信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元等定量评价指标。

(3) 分别将样本集中所有的辐射校正精度评价指标构成特征向量,领用基于支持向量机的聚类方法对构成的特征向量集进行训练,生成遥感影像辐射校正精度评价分类器

(4) 将测试集中的影像辐射校正精度评价指标构成特征向量放入分类器,获得相应的评价等级标签。

(5) 比较测试集中的评价等级与专家打分评价的标签,如果精度符合要求则可以用此分类器用于待评价影像进行基于支持向量机的影像辐射校正精度评价,否则重新筛选评价指标和评价指标数学模型重新构建特征向量重新训练分类器。

3.2.2 影像辐射校正精度模糊综合评价法

影像辐射校正精度的影响因子本文我们选择了 6 个分别是信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元,他们都具有复杂性、模糊性和不确定性。因此可以选择模糊综合模型对影像辐射校正精度进行综合评价。

影像辐射校正精度模糊综合评价主要的方法步骤为:

(1) 根据影像辐射校正精度影像因子建立评价因素集:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\} \quad (3-8)$$

其中 m 表示评价因子的个数。

根据设计的阈值分级数量建立评价等级集:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (3-9)$$

式中 n 表示评价等级的个数。

(2) 根据层次分析法或者专家打分法确定评价因素对应的权重集:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\} \quad (3-10)$$

(3) 根据评价因素集和评价等级集选择隶属度函数并构建模糊矩阵, 则会有 $m \times n$ 阶模糊矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

式中 r_{mn} 代表第 m 个因素关于第 n 个等级的隶属度。同一个影像所有的隶属度的和为1。

(4) 根据权重向量和模糊矩阵运算可以得到最后模糊评价的结果:

$$B = W \times R \quad (3-12)$$

根据模糊数学中最大隶属度的规范, 影像辐射校正精度评价的结果取决于 B 中各个级别隶属度的大小。

3.3 基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价

本文选择的信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元这6个影像辐射校正精度的影响因子所计算的基本单元都是整张影像, 这样计算出来的是整张影像的辐射特征指标, 对于某些领域的影像应用还有影像的初步筛选精度已经足够, 但是对于某些对于遥感影像细部辐射校正精度要求较高的领域, 如矿山遥感领域, 其选择遥感影像的首要条件就是影像中矿山部分的精度一定达到要求, 对整体的精度要求相对宽松。这时候如果使用传统的以整幅影像为评价单元对整幅影像进行评价显然不合适, 本文提出了一种基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价的方法可以对上述存在的问题进行改善。

由于矿山遥感的特性对遥感影像矿山细部要求较高, 使用整体影像的辐射校正精度可能无法满足要求, 这时可以对影像进行分割, 使分割单元的大小符合矿山的大小, 然后以分割单元为基础分别进行信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元6个影像辐射校正精度的影响因子的计算, 这样分割后可以体现影像细部的辐射校正精度, 可以提高矿区内的辐射校正精度评价结果。分割影像可以直接以影像中矿山的矢量为基准做缓冲区或者使用其封装边界为基准, 然后计算选取的6个影像辐射校正精度的影响因子, 进行辐

射校正精度评价,但是这样做有一个很大的问题,就是过度关注矿山局部忽略了主体。这时可以采用通过统计评价区域内矿山的大小来确定分割影像 PixelBlock 的大小,然后对整张影像进行分割,再以每个分割单元为基础对整张影像的分割单元进行影像辐射校正精度的影响因子的评价计算,这样做既可以满足矿山局部的精度要求,也可以满足整体的需要,同时可以兼顾矿权内其他有关地物的辐射校正精度。在实际实验中效果较好。

本次实验统计了浙江省、青海省、江苏省、北京市四个地区的矿山开采面发现平均边长在 250m 以下的矿山在 70.8%-76.8%之间,平均边长在 500m 以下的矿山在 95.1%-96.7%之间,平均边长在 1000m 以下的矿山在 99.6%以上,使用边长为 500m 的 PixelBlock 影像进行分割可以既可以兼顾评价精度又兼顾评价效率。统计情况可见表 3-2:

表 3-2 分省矿山开采面边长统计表

省份\开采面长	250m	500m	1000m
北京市	80.1%	98.2%	99.9%
浙江省	70.8%	95.1%	99.7%
青海省	72.2%	93.8%	97.7%
江苏省	76.8%	96.7%	99.6%

3.4 实验结果及分析

3.4.1 研究区概况

本文选择了北京市昌平区作为实验的研究区域,经纬范围为 $40^{\circ} 02'18''N - 40^{\circ} 23'13''N$, $115^{\circ} 50'17''E - 116^{\circ} 29'49''E$,位于北京西北部,北与延庆区、怀柔区相连,东邻顺义区,南与朝阳区、海淀区毗邻,西与门头沟区和河北省怀来县接壤。见图 3-1:

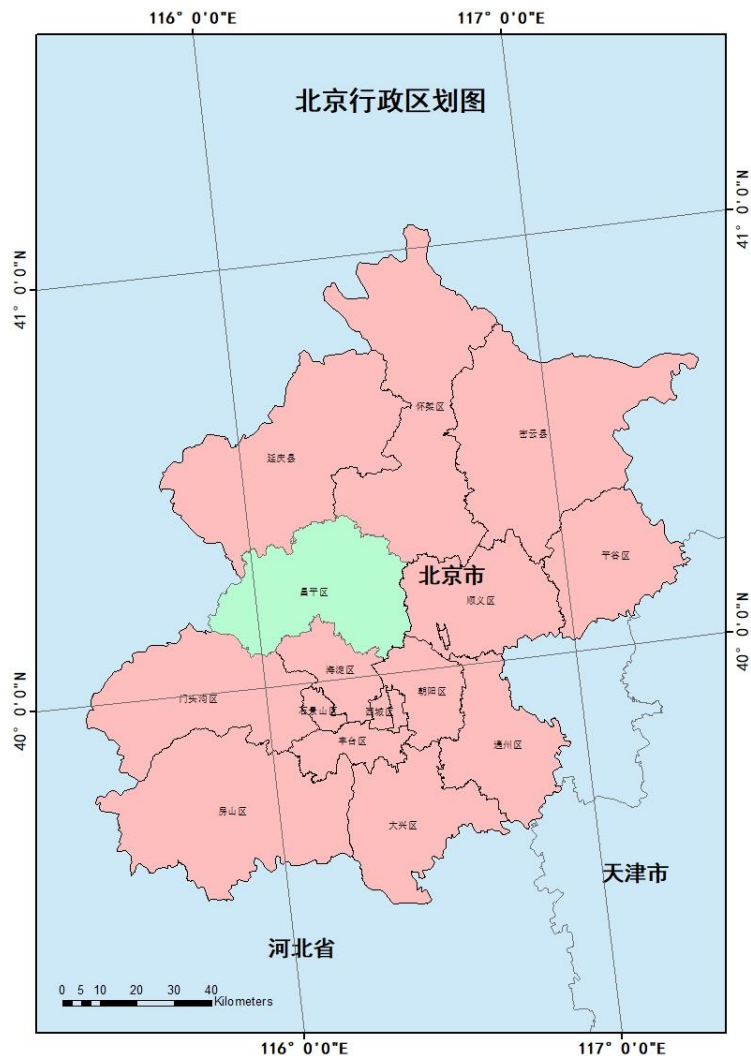


图 3-1 北京市昌平区行政区划图

3.4.2 数据

本次实验全部采用的是高分二号的遥感卫星数据。

高分二号卫星是国家高分辨率对地观测系统重大专项首批启动研制的卫星^[1]，高分二号卫星是中国首颗自主研发的空间分辨小于 1 米的民用光学遥感卫星，搭载有两台高分辨率 1 米全色、4 米多光谱相机，它实现了亚米级高分辨率大幅宽成像的突破，大大的提升了卫星对地综合观测效能，达到了国际先进水平。

高分二号卫星于 2014 年 8 月 19 日成功发射，紧接着 2014 年 8 月 21 日第一次开机成像并下传影像数据。高分二号卫星成功发射并投入使用，标志着我国遥感卫星正式进入了“亚米级时代”。主要为国家政府部门提供影像数据支持，同时还为其他用户部门提供示范应用服务。

高分二号卫星基于资源卫星 CS-L3000A 平台开发，重量为 2100kg，设计寿命为 5~8

年,运行轨道为高度 631km、倾角 97.9°、降交点地方时上午 10:30 的太阳同步回归轨道,装载两台 1 米全色/4 米多光谱相机实现拼幅成像,星下点分辨率全色为 0.81m、多光谱为 3.24m,成像幅宽为 45km^[1]。

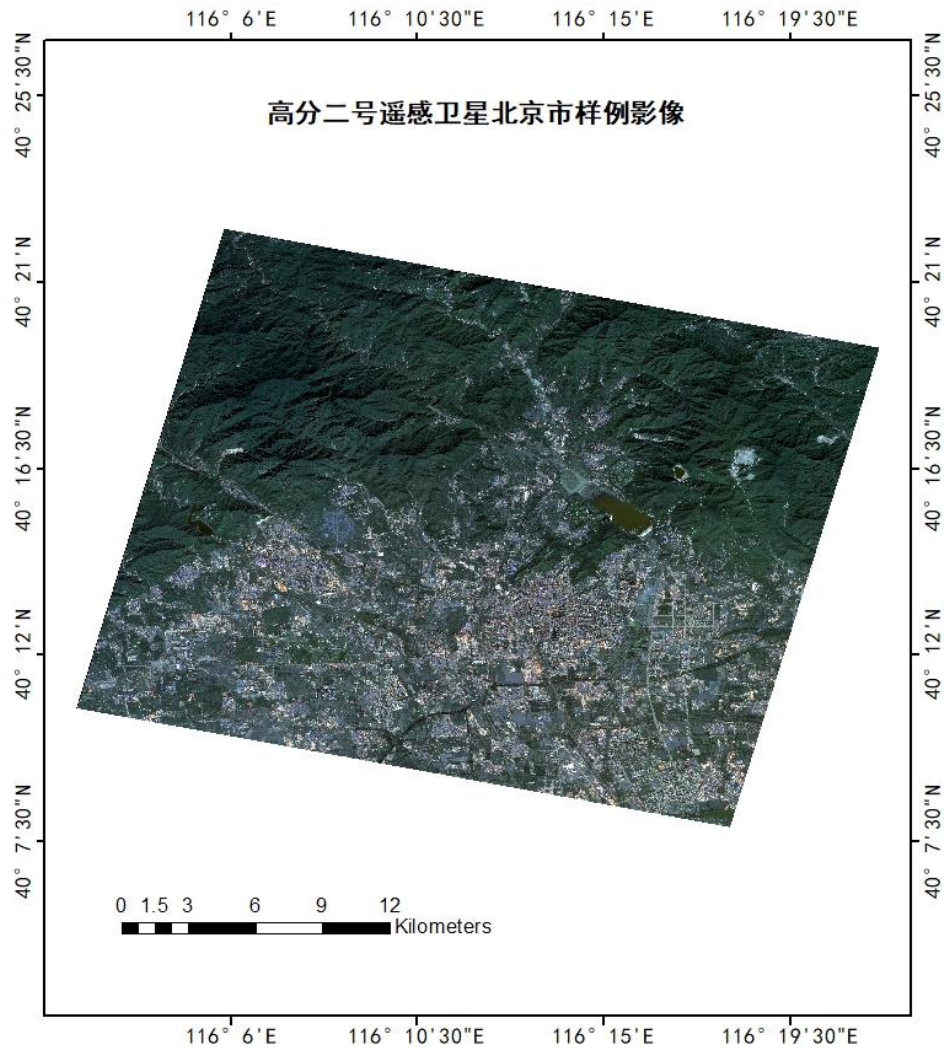


图 3-2 高分二号遥感卫星北京市昌平区试验区影像

本文实验部分将以图 3-2 中影像的中心点经纬度坐标为 40°15'3.214"N, 116°11'57.221"E 的影像作为实验区影像。

3.4.3 实验过程

(1) 数据预处理

本次实验中对于信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元 6 个影像辐射校正精度的影响因子的计算都是基于灰度影像实现的,获取的影像都是全色影像所以需要转换为灰度影像然后进行后续的计算,转换公式如下:

$$Gray = 0.2126 \times R + 0.7152 \times G + 0.0722 \times B \quad (3-13)$$

式中 R 为影像的红色波段， G 为影像的绿色波段， B 为影像的蓝色波段

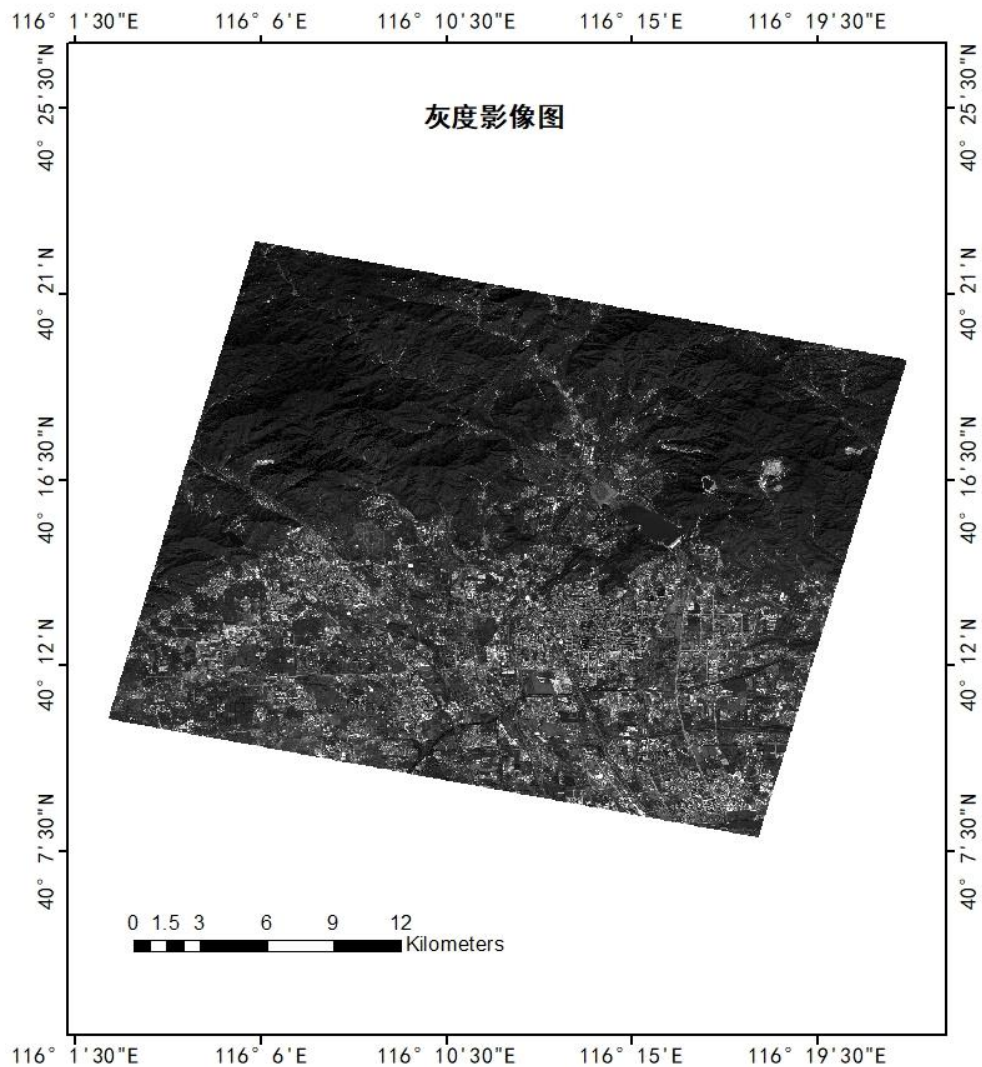


图 3-3 样例区灰度影像

(2) 影像辐射校正精度的影响因子计算

为了实现本论文的所有实验部分的内容，依托本文辐射校正精度、几何校正精度和基于 PixelBlock 遥感影像分割的理论依据开发了高分二号影像产品综合检验系统从而进行理论部分的实验验证工作。

(a) 计算影像因子

高分二号影像产品综合检验系统已经将信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元 6 个影像辐射校正精度的影响因子的计算评定部分依据本章前面的理论部分全部实现。高分二号影像产品综合检验系统提供了两个尺度对遥感影像的辐射校正精度的检验，

可以以整幅影像为基准做系统性的辐射校正精度检验，也可以使用上文提出的改进方法通过 PixelBlock 分割遥感影像然后再进行细部的辐射校正精度的检验，提高细部的辐射校正精度检验的精度，通过高分二号影像产品综合检验系统可以直观、高效的看到辐射校正精度因子的精度。

选择辐射校正精度单因素评价菜单中的信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元 6 个影像辐射校正精度的影响因子，可以直接完成选择因子的辐射校正精度评价，各个因子根据数学模型分别设定不同的阈值从而对每个因子计算的结果进行进一步量化：

灰度分布的量化阈值见表 3-3：

表 3-3 灰度分布量化阈值表

各级灰度出现概率的均方差	评级等级
$[0, 0.1)$	优
$[0.1, 0.3]$	良
$(0.3, 0.6]$	合格
$(0.6, +\infty)$	不合格

信息量的量化阈值见表 3-4：

表 3-4 信息量量化阈值表

信息熵	评级等级
$(8, +\infty)$	优
$(4, 8]$	良
$(1, 4]$	合格
$[0, 1]$	不合格

清晰度的量化阈值见表 3-5：

表 3-5 清晰度量化阈值表

平均梯度	评级等级
$(5, +\infty)$	优
$(3, 5]$	良
$(1, 3]$	合格
$[0, 1]$	不合格

噪声的量化阈值见表 3-6：

表 3-6 噪声量化阈值表

逆变动系数	评级等级
$(50, +\infty)$	优

(25, 50]	良
(10, 25]	合格
[0, 10]	不合格

云量的量化阈值表见表 3-7:

表 3-7 云量量化阈值表

云量占比	评级等级
[0, 0.02]	优
(0.02, 0.05]	良
(0.05, 0.1]	合格
(0.1, 1]	不合格

无效像元的量化阈值表见表 3-8:

表 3-8 无效像元量化阈值表

无效像元占比	评级等级
[0, 0.1]	优
(0.1, 0.2]	良
(0.2, 0.3]	合格
(0.3, 1]	不合格

依照上述表格中的阈值可以完成全部 6 个辐射校正精度影像因子的计算，计算完成后可以进行后续的辐射校正精度模糊综合评价。为了方面后面的计算可以将优标记为整形数字 4，将良标记为整形数字 3，将合格标记为整形数字 2，将不合格标记为整形数字 1。

(b) 辐射校正精度模糊综合评价

进行完信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元 6 个影像辐射校正精度的影响因子的计算可以进行辐射校正精度的模糊综合评价得出一个整体的评价结果。

则可以得到因素论域:

$$U = \{\text{灰度分布}(u_1), \text{信息量}(u_2), \text{清晰度}(u_3), \text{分辨率}(u_4), \text{噪声}(u_5), \text{云量}(u_6), \text{无效像元}(u_7)\} \quad (3-14)$$

评语论域:

$$V = \{\text{优}(v_1), \text{良}(v_2), \text{合格}(v_3), \text{不合格}(v_4)\} \quad (3-15)$$

则有 7×4 阶的模糊矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{71} & \cdots & r_{74} \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

通过专家评定与参考专业资料得到各评价因子的模糊权重向量为:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7\} \quad (3-17)$$

其中 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 分别代表灰度分布、信息量、清晰度、噪声、云量、无效像元 6 个辐射校正精度影响因子的权重他们的值见表 3-9:

表 3-9 辐射校正精度各影响因子权重

因子	权重
灰度分布	0.16
信息量	0.24
清晰度	0.23
噪声	0.13
云量	0.17
无效像元	0.07

经合成运算可以得到综合评价结果:

$$B = A * R \quad (3-18)$$

模糊综合评价后影像属于各质量等级的隶属度为:

$$B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\} \quad (3-19)$$

根据影像属于各质量等级的隶属度从而确定影像辐射校正精度的好坏。遥感影像的辐射校正精度模糊综合评价的数学模型和流程已经在高分二号影像产品综合检验系统实现。

首先选择参数设置然后就可以看到所有的评价完的因子评价等级, 和所有未完成评价的因子状态如图 3-4 中所示, 在完成信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元 6 个影像辐射校正精度的影响因子的计算后就可以进行模糊综合评价, 选择开始评价后就可以通过模糊综合评价模型计算最后的辐射校正精度模糊综合评价结果, 见表 3-10:

表 3-10 辐射校正精度各影响因子评价结果

因子	评价等级
灰度分布	3
信息量	2
清晰度	3
噪声	4
云量	4
无效像元	4

(c) 基于 PixelBlock 遥感影像分割的辐射校正精度评价

由于基于整幅遥感影像辐射校正精度无法反应细部的精度，无法满足例如矿山遥感的细部高精度的需求所以，本文提出了基于 PixelBlock 遥感影像分割的辐射校正精度评价方法，并且将其数学模型集成到了高分二号影像产品综合检验系统中进行实验，如图 3-4 所示：

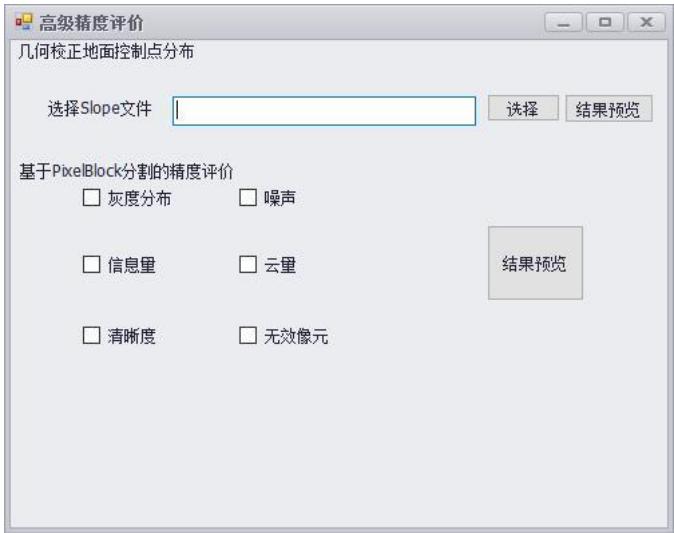


图 3-4 基于 PixelBlock 遥感影像分割的辐射校正精度评价界面

在系统中打开高级精度评价窗口然后在基于 PixelBlock 分割的精度评价部分选择需要评价的因子，可以选择一个因子进行评价，例如选中灰度分布然后进行评价就会先对整幅影像进行基于 PixelBlock 的分割然后再以分割的每个部分为基准分别进行灰度分布的评价计算；可以选择多个因子进行多因子评价，例如同时选中信息量和清晰度两项然后进行评价，然后系统就会先对整幅影像进行基于 PixelBlock 的分割然后以每个分割的部分为基准分别进行信息量和清晰度的评价计算，然后通过加权综合的方法，计算得到最后的结果；可以选择全部因子后进行评价，系统就会先对整幅影像进行基于 PixelBlock 的分割然后以每个分割的部分为基准然后分别进行灰度分布、信息量、清晰度、噪声、云量、无效像元 6 个辐射校正精度影响因子的计算，然后通过模糊综合评价方法得到最后的评价结果。

3.4.4 实验结果分析

经过计算得到信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元 6 个影像辐射校正精度的影响因子的结果分别为：

(1) 灰度分布

灰度分布以整体影像为基准计算，得到样本影像的灰度级概率均方差为：0.1579，根

据阈值量化结果得到的评价等级为良。

进行完 PixelBlock 的分割以分割的部分为基准计算的灰度分布的结果分布如图 3-5 所示：

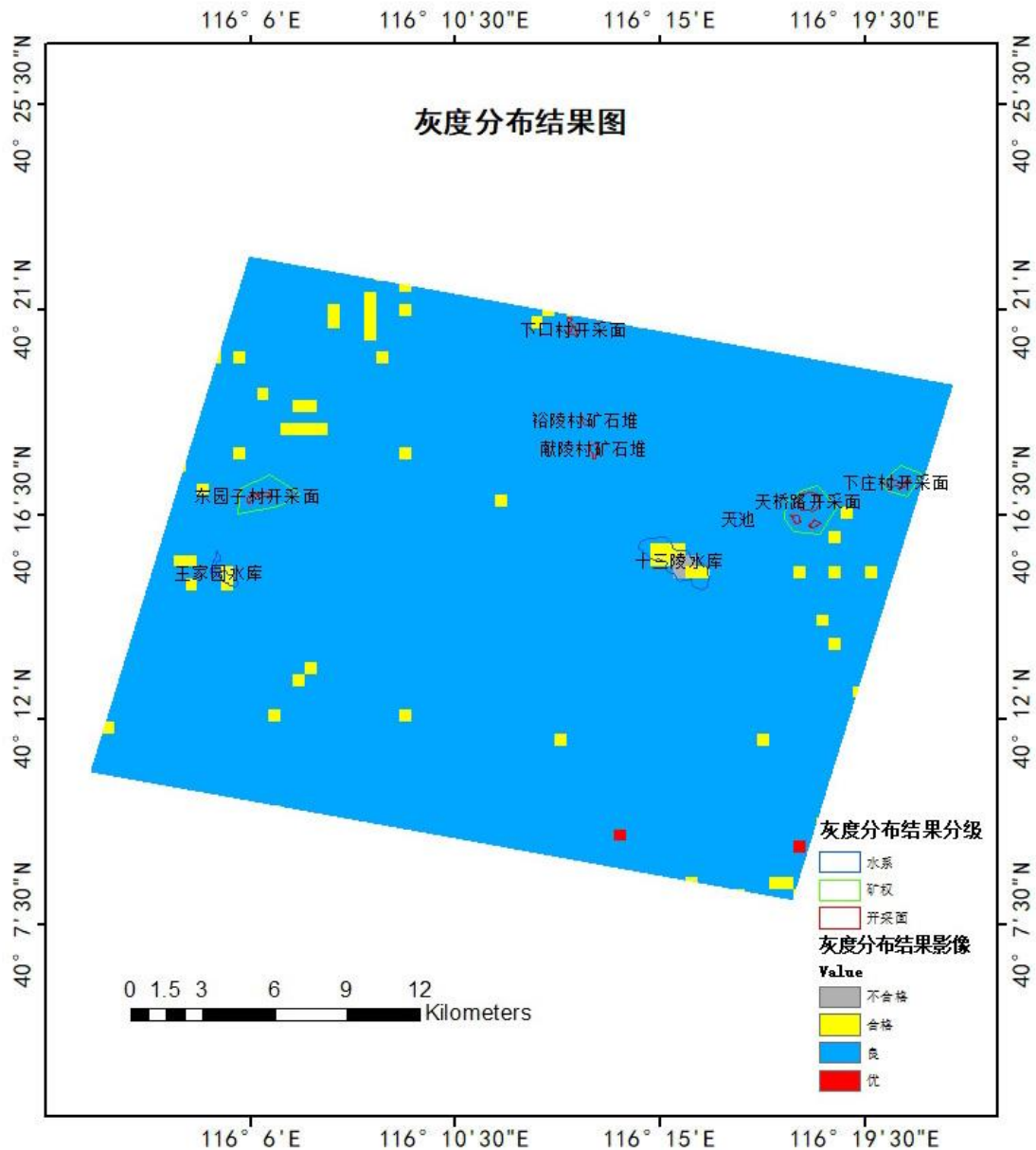


图 3-5 灰度分布评价结果图

从基于 PixelBlock 遥感影像分割的灰度分布评价结果图中可以看出，影像经过分割后灰度分布的结果对矿区的影像不大基于整张影像的辐射校正精度评价结果为良，经过分割后样本区中所有的开采面和矿石堆的评价结果还是良，没有发生明显变化，但是在十三陵水库出现了灰度分布不合格的区域还有精度降低的合格区域，王家园水库也出现了精度降低的合格区域，分析原因是因为水体的漫反射的原因导致水体的灰度级分布不均匀，从而导致水体灰度分布精度降低。

(2) 信息量

信息量以整体影像为基准计算，得到样本影像的信息熵为：1.3159，根据阈值量化结果得到的评价等级为合格。

进行完 PixelBlock 的分割以分割的部分为基准计算的信息量的结果分布如图 3-6 所示：

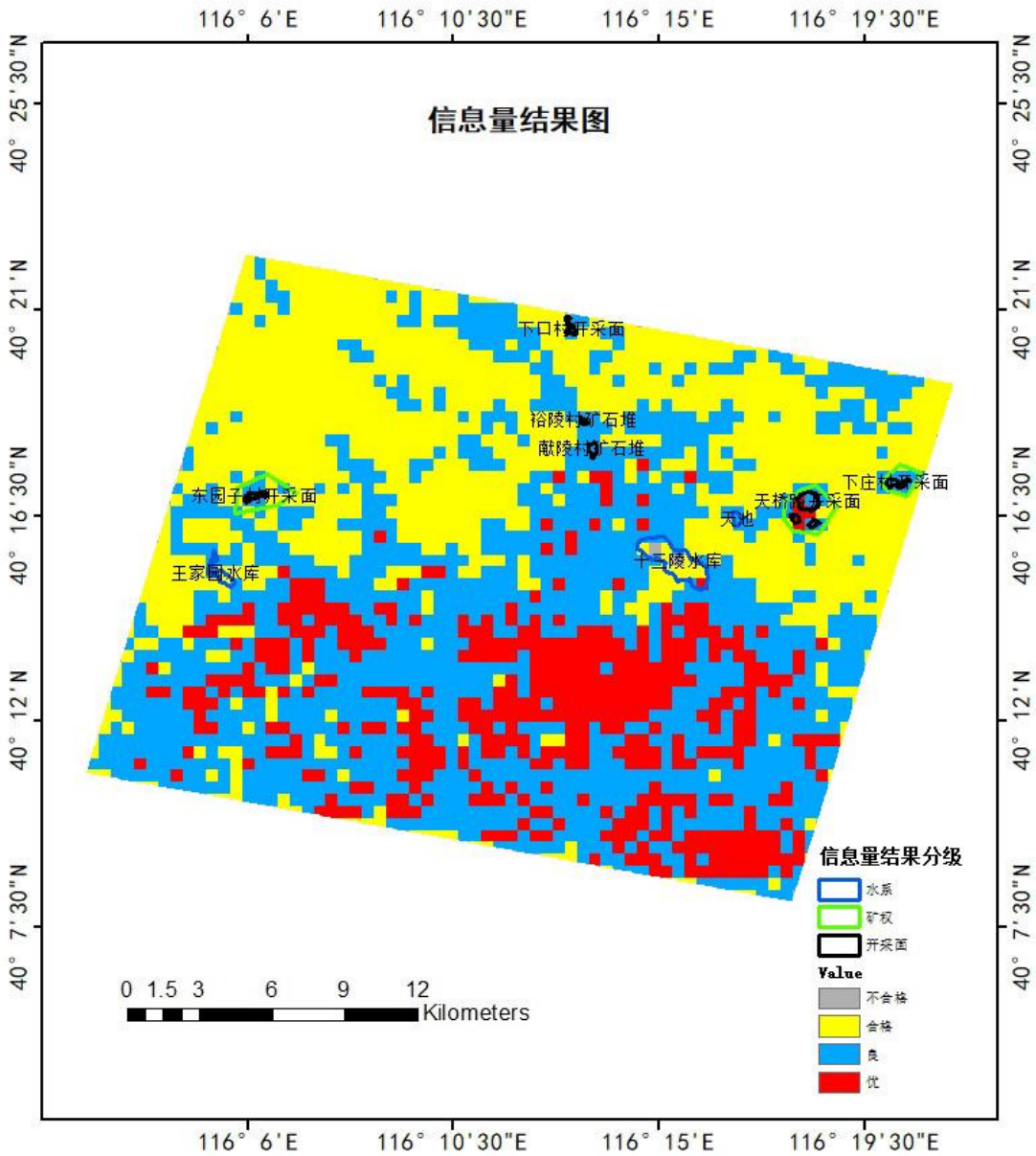


图 3-6 信息量评价结果图

从基于 PixelBlock 遥感影像分割的信息量评价结果图中可以看出，虽然基于整张影像的信息量评价结果不高为合格，但是对比影像可以看出，主要是受影像中北部山体影响的原因。由于地形对辐射校正的影响，北面山区的辐射校正精度误差较低，但是在山区的开采面由于开采的原因开采面都较为平整，一般不受山体的影响，辐射校正的精度反而较高。从图中可以看出所有的开采面和矿石堆的图斑处信息量的评价结果都为良，比影像的整体

评价结果要好，天桥路开采面的评价结果还包含有优的区域。从图中还可以看出水体的信息量评价精度都不高，十三陵水库的位置出现了精度降低的不合格区域。

(3) 清晰度

清晰度以整体影像为基准计算，得到样本影像的平均梯度为：3.9500，根据阈值量化结果得到的评价等级为良。

进行完 PixelBlock 的分割以分割的部分为基准计算的清晰度的结果分布如图 3-7 所示：

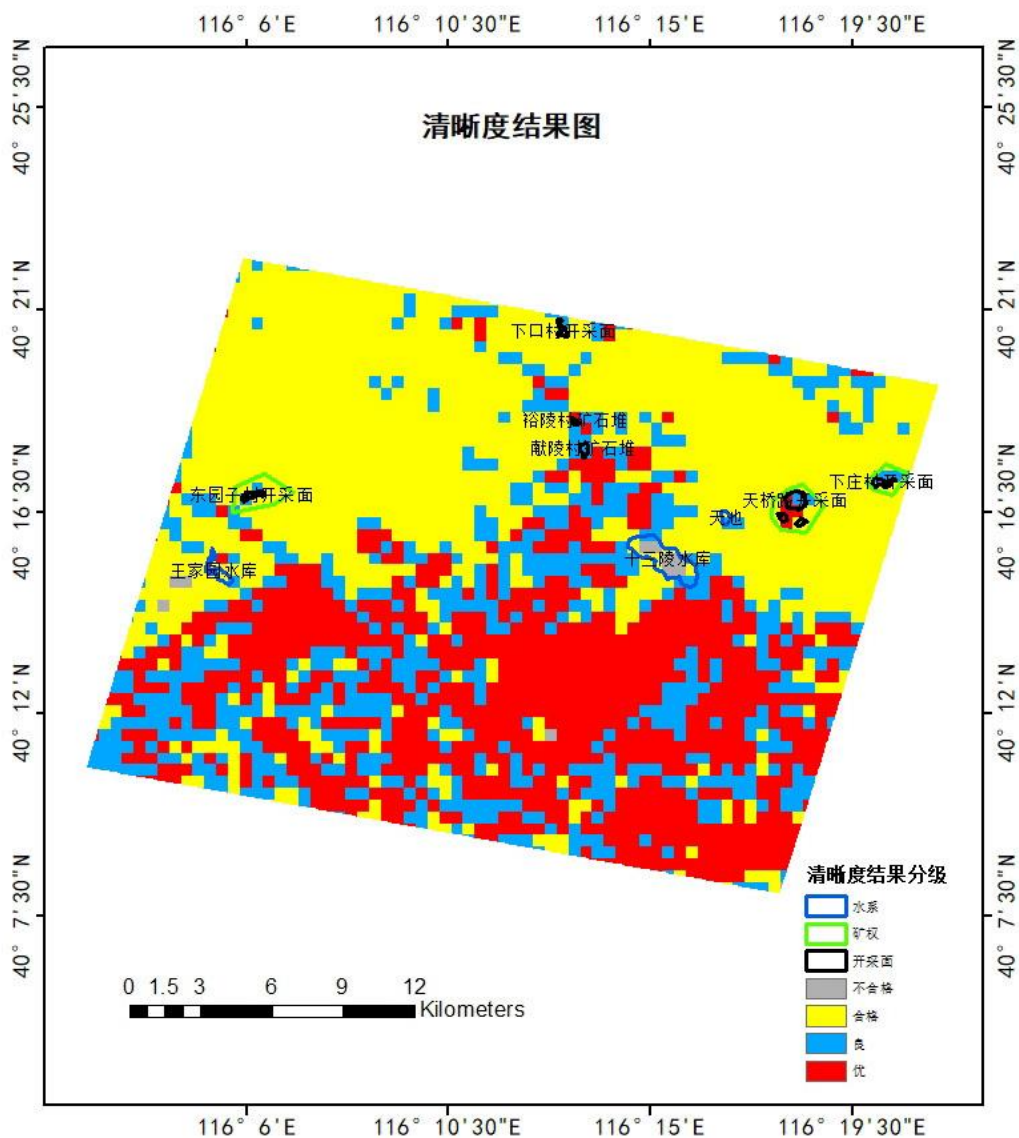


图 3-7 清晰度评价结果图

从基于 PixelBlock 遥感影像分割的清晰度评价结果图中可以看出，虽然影像的清晰度整体评价较高为良，但是结合清晰度评价结果对比影像发现，南部的平原的清晰度普遍很高大部分的评价结果都为优，但是北部山区受地形的影响清晰度普遍偏低。山区中面积较

(4) 噪声

进行完 PixelBlock 的分割以分割的部分为基准计算的噪声的结果分布如图 3-8 所示:

图 3-8 噪声评价结果图

结果虽然为优，但是由于噪声梯度检测算法的原因，试验区南部昌平市区由于地物基本上都是房屋地物比较细碎，并且影像的分割单元都是基于矿山的大小选择划分的，分割单元较小，每个单元内部的光谱特征容易与周围单元产生较大的差异性，导致噪声评价结果较低。但是在试验区北部山区由于树木覆盖的原因，采用较小的分割单元能够很好的反应分割单元间的差异性。由于开采面大多数都分布在山区，切分割的单元与开采面大小接近，所以对于矿山部分的检测结果比较准确。总的来说对于噪声评价来说平原和山地适合采用不同大小的分割方法来分割，从而进一步提高噪声检验的准确性，具体有待进一步研究。

(5) 云量

云量以整体影像为基准计算，得到样本影像的云量占比为：0.000001576，根据阈值量化结果得到的评价等级为优。

进行完 PixelBlock 的分割以分割的部分为基准计算的云量的结果分布如图 3-9 所示：

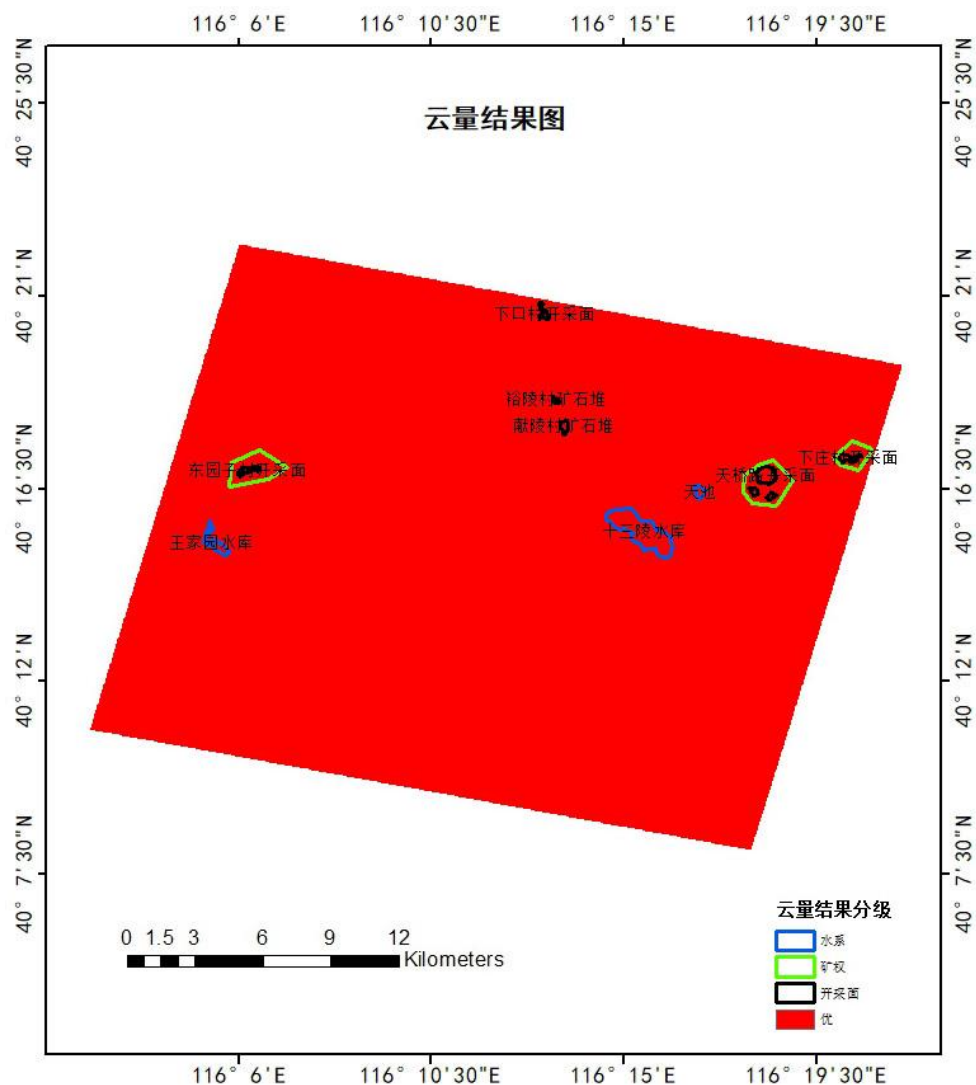


图 3-9 云量评价结果图

(6) 无效像元

进行完 PixelBlock 的分割以分割的部分为基准计算的云量的结果分布如图 3-10 所示:

图 3-10 无效像元评价结果图

(7) 辐射校正精度模糊综合评价

在进行完信息量、灰度分布、清晰度、噪声、云量、无效像元 6 个影像辐射校正精度的影响因子的计算后可以辐射校正精度模糊综合评价计算。

计算得到以整体影像为基准计算得到样本影像的模糊综合评价等级为良。

做完基于 PixelBlock 遥感影像分割的全部 6 个因子的评价都,可以得到如图 3-11 的结果:

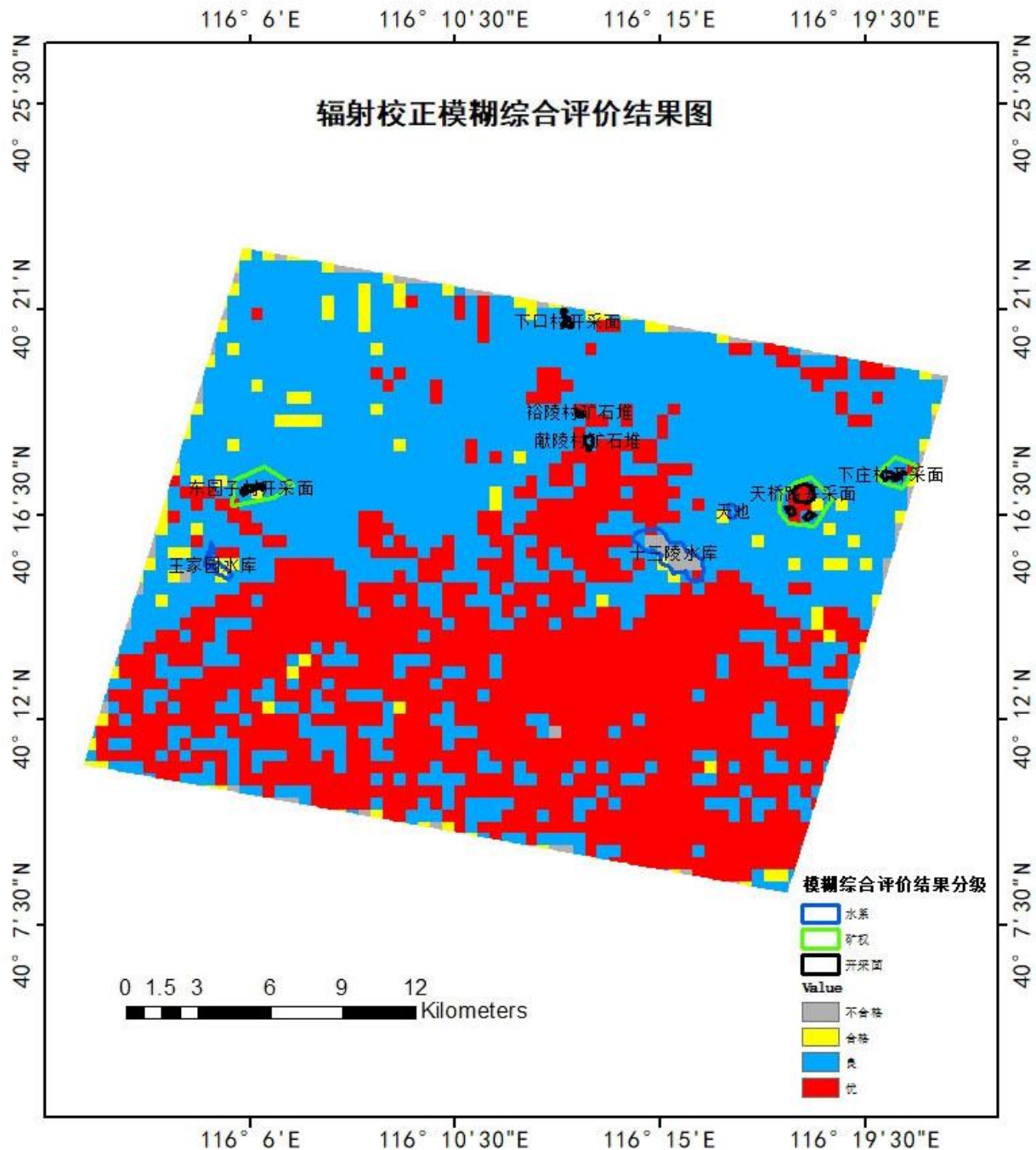


图 3-11 基于 PixelBlock 遥感影像分割的辐射校正精度模糊综合评价结果图

从于 PixelBlock 遥感影像分割的辐射校正精度模糊综合评价结果图中可以看出，从整体来看南部平原的辐射校正精度最高，模糊数学综合评价等级为优；北部山区的辐射校正精度次之，模糊数学综合评价等级为良；影像四周边界的辐射校正精度较差，模糊数学综合评价等级为合格和不合格；对比影像细部地物发现影像南部平原地区辐射校正精度相对较高的是建筑和道路，模糊数学综合评价等级为优，原因是建筑和道路都是人工建成的表面都比较规则，对光的辐射反射的比较均匀，南部出现的模糊数学综合评价等级为良的区域对比原始影像发现大多为覆盖着植被绿地和农田，因为光辐射收到植被叶片漫反射的影像造成影像中植被模糊还有边界的不清晰；北部山区的地区大多数山体由于地形和植被的双重影响，导致大多数山体的辐射校正精度相对较差。但是矿山的开采面相对来说辐射校正都偏高，尤其是面积较大的开采面地形相对较为平坦，开采面也较为规律平整，如天桥路开采面内部的模糊数学综合评价等级为优；存在一些面积较小的开采面，容易受到地形的影响，并且开采面内地物相对杂乱，从而导致辐射校正精度反而变低，如东园子村开采面内部出现模糊数学综合评价等级为合格的区域。整体评价结果最低的就是水体，如十三陵水库模糊数学综合评价等级为不合格。

3.5 本章小结

本章介绍了首先介绍了选择的影像辐射精度评价的评价因子及计算方法和遥感影像辐射校正精度综合评价方法，然后提出了基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价方法提高了影像辐射精度评价的评价的精度，最后通过实验分析了试验区域每个影像辐射精度评价的评价因子的结果以及试验区域模糊综合评价的结果，并通过基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价方法做的对比实验综合的评价了影像的辐射精度。

4 影像几何精度评价

遥感影像做完几何精校正后，在日常生产中需要先对其进行精度评定后确定几何校正精度达到要求后再投入使用，目前常用的几何校正精度检验的方法有：

(1) 计算影像几何校正中每个控制点与遥感影像中的标识点对应点的中误差和均方根误差。

(2) 计算从地形图中采集的特征点或者实地测量的控制点与进行完几何校正的遥感影像中的对应特征点的点位中误差和均方根误差。

(3) 利用 ArcGIS、ENVI 等软件进行几何校正后，用户选择以地形图为参考选择地形图中的特征点为控制点基准在校正影像上选择对应点进行校正，或者用户选择已有校正过的影像为参考，直接在目标影像和参考影像间选择对应点，进行完匹配计算后得到每个纠正点的点位中误差和他们的均方根误差

(4) 遥感影像进行完几何校正后并且进行完影像镶嵌后，在遥感影像间的接边处，计算同名地物的同名点的误差。

通过以上四种方法可以有效的检验整张影像的几何校正精度，但是由于受到地形的影响山地区域的控制点分布密往往密度要比平原小，并且如果从地形图中找山区部分的特征点，在影像上找点时，受地形影像可能对应点找的位置不准确。所以通过对地形进行分区考察不同分区内的校正控制点的密度和分布非常重要。并且在某些对于局部几何校正精度要求比较高的行业，如矿山遥感领域，在进行几何校正的时候可能在矿区内没有足够数量的控制点导致整体影像可能满足精度，但是矿区内的几何校正精度没有满足要求。这时就需要对矿区内的几何校正精度及其分布进行检验。

本章选择的评价几何校正精度的方法是计算从地形图中采集的样本影像中的特征点并从影像中选择对应点，并且计算他们对应的点位中误差和均方根误差。本章提出了一种提高矿区几何校正精度的方法可以对矿区内的几何校正精度做出提高。

4.1 几何校正精度评价模型

4.1.1 点位中误差

(1) 点位横向误差

点位横向误差为从地形图中量测的控制点的横坐标与影像上对应点的横坐标的差值，公式为：

$$\Delta x_i = X_i - x_i \quad (4-1)$$

式中 X_i 为地形图中量测的控制点 i 的横坐标， x_i 为影像上对应点 i 的横坐标。

（2）点位纵向误差

点位纵向误差为从地形图中量测的控制点的纵坐标与影像上对应点的纵坐标的差值，公式为：

$$\Delta y_i = Y_i - y_i \quad (4-2)$$

式中 Y_i 为地形图中量测的控制点 i 的纵坐标， y_i 为影像上对应点 i 的纵坐标。

（3）点位中误差

点位中误差为点位横向误差的平方和点位纵向误差的平方和的平方根，公式为：

$$s_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \quad (4-3)$$

式中 Δx_i 为点 i 的点位横向误差， Δy_i 为点 i 的点位纵向误差。

4.1.2 均方根误差

均方根误差反应的是观测值与真值偏差的平方和，与观测次数 n 比值的平方根，公式为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n s_i^2}{n}} \quad (4-4)$$

式中 s_i 为点 i 的点位中误差， n 为检查点的个数。

4.1.3 全局莫兰指数 Moran's I

为了检验所有几何校正精度验证点的点位中误差在整张影像上的相关性可以通过全局莫兰指数来描述。几何校正精度验证点的点位中误差在整张影像上的相关性越弱代表所有的验证点的误差分布越随机，几何校正精度越好。点位中误差全局莫兰指数的计算公式为：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (s_i - \bar{s})(s_j - \bar{s})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2} \quad (4-5)$$

其中 n 是几何校正精度验证点的总个数， s_i 为第 i 个几何校正精度验证点的点位中误差， s_j 为第 j 个几何校正精度验证点的点位中误差， \bar{s} 为所有几何校正精度验证点的点位中误差的均值， w_{ij} 为第 i 、 j 个几何校正精度验证点之间的空间权重矩阵。

I 的取值范围为-1 到 1 之间，其中当 $I > 0$ 时表示检验影像内所有的几何校正精度验证点的点位中误差存在正相关性，在空间上的聚集性越强；当 $I = 0$ 时表示检验影像内所有的几何校正精度验证点的点位中误差在区域内随机分布，空间上没有相关性；当 $I < 0$ 时表示检验影像内所有的几何校正精度验证点的点位中误差存在负相关性，在空间上的聚集性越

弱。

通过计算莫兰指数可以很好地检验整张影像几何校正精度验证点点位中误差的相关性。

4.1.4 局部莫兰指数 Moran's I

为了检验整体空间点位中误差在哪个部分聚集，需要引入局部莫兰指数来检验。

局部莫兰指数可以解决两个全局莫兰指数无法反映的问题：

(1) 如果点位中误差全局莫兰指数的绝对值接近于 1，证明影像范围内点位中误差空间相关性很强，但是不知道具体空间相关性强的点位中误差聚集的空间位置，这时使用局部莫兰指数可以做出指示。

(2) 如果全局莫兰指数为 0，但是不代表局部上没有几何校正精度验证点的点位中误差的聚集的情况，这时通过局部莫兰指数就可以做出反应。

点位中误差局部莫兰指数的计算公式为：

$$I_i = \frac{n(s_i - \bar{s}) \sum_{j \neq i}^n w_{ij}(s_j - \bar{s})}{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2} \quad (4-6)$$

其中其中 n 是几何校正精度验证点的总个数， s_i 为第 i 个几何校正精度验证点的点位中误差， s_j 第 j 个几何校正精度验证点的点位中误差， \bar{s} 为所有几何校正精度验证点的点位中误差的均值， w_{ij} 为第 i 、 j 个几何校正精度验证点之间的空间权重矩阵。

通过局部莫兰指数可以很好地查看影像内所有的几何校正精度验证点的点位中误差的空间相关性的分区情况。

4.2 提高矿区几何校正精度的方法

一般情况下遥感影像进行完几何校正后对整张影像选取的校正的控制点进行检查，只要精度符合要求就可以投入生产使用，但是对于矿山遥感领域对于局部要求较高的行业，矿山内的精度可能不理想，这是因为矿区大多在山区，受地形的影响，在影像中选取山地的校正点与实际存在较大误差并且密度可能较稀疏，从而导致山区的矿山的几何校正精度较低。为了提高矿区的几何校正精度，本章的实验思路是：

(1) 从地形图和遥感影像中选择分布均匀特征点作为检验遥感影像的几何校正精度的验证点，并分别计算所有点的点位中误差和均方根误差

(2) 计算试验区矿区内的验证点的点位中误差和均方根误差

(3) 计算影像内所有验证点点位中误差的全局莫兰系数，查看整体点位中误差的分布

是否均匀，若点位中误差整体分布均匀，则计算局部墨兰系数查看点位中误差是否存在分布不均匀的区域；若点位中误差整体分布不均匀，也需要计算局部墨兰系数查看点位中误差分布情况。

（4）利用实验区域的 DEM 计算试验区域内的坡度，并且对坡度进行分级，对比计算不同坡度分区内的验证点的均方根误差，对比计算的局部莫兰系数，从而得到不同地形分区内的几何校正精度。

（5）如果山区的几何校正精度较低，则在山区添加控制点，并调整原有的控制点的位置，查看矿区、山区、整体不同尺度下点位中误差的以及均方根误差的变化。

4.3 实验结果及分析

4.3.1 研究区概况

本章实验的研究区域为北京市昌平区与第三章的研究区域完全相同。

4.3.2 数据

（1）高分二号卫星数据

本章实验中采用的高分二号卫星影像数据与第三章中才用的高分二号卫星影像数据相同。

（2）地形图

本章实验中收集了昌平区的 1:50000 的地形图，从地形图中采集检验的控制点 75 个，均匀分布在实验区域中，如图 4-1 所示：

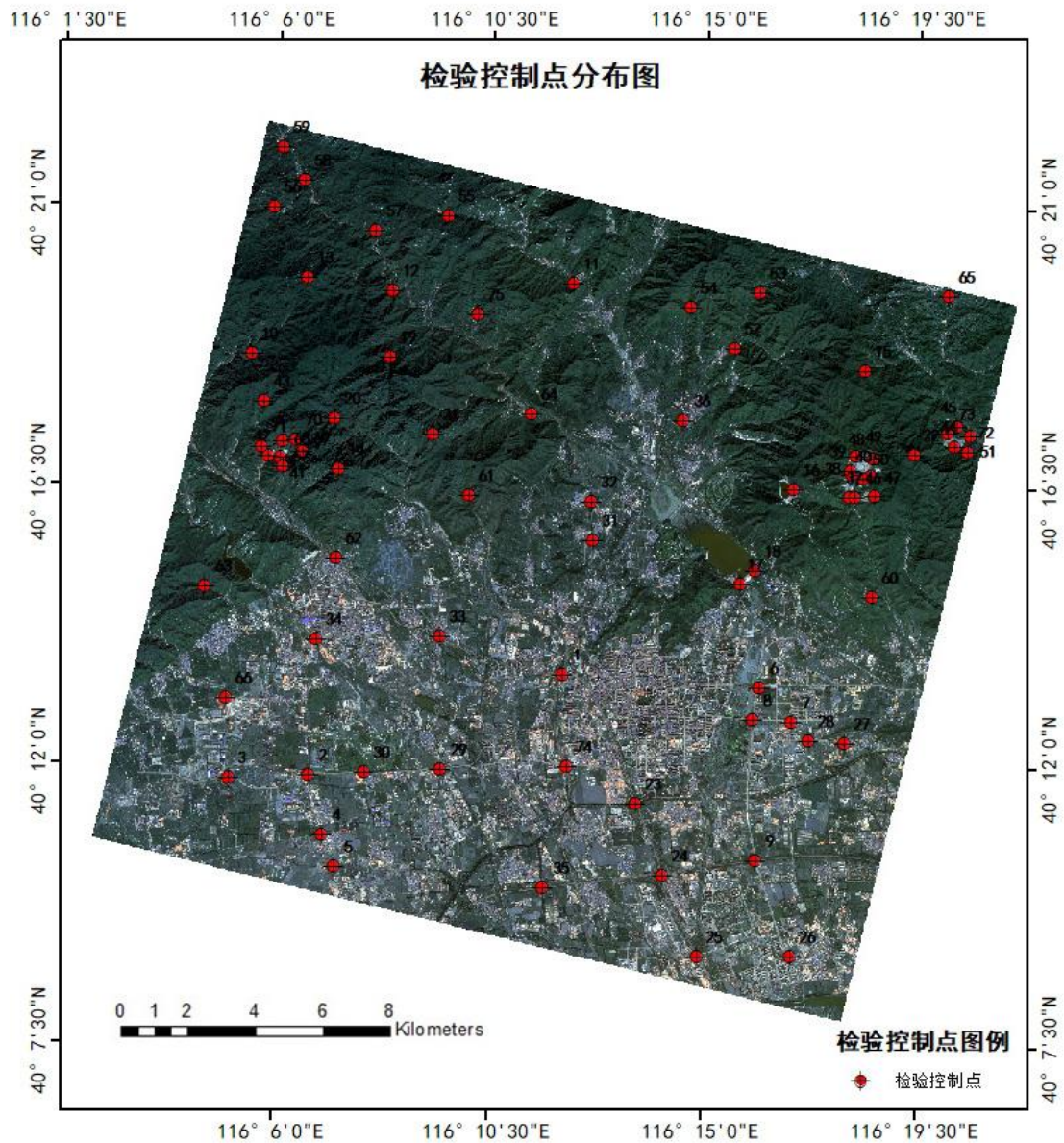


图 4-1 从地形图中采集的检验控制点分布图

(3) 数字高程模型 DEM

数字高程模型 (Digital Elevation Model, 简称 DEM) 是地表形态的数字化表达, 蕴含了丰富的地学应用分析所必需的地形地貌信息^[17]。数字高程模型定义为通过有限的地形高程数据实现对地形曲面的数字化模拟^[17], 本文通过数字高程模型计算研究区域的坡度, 根据研究区域的坡度进行分级, 从而对不同地形分区内部的几何校正精度进行检验, 试验区域的 DEM 见图 4-2, 利用 ArcGIS 可以计算区域的坡度图, 见图 4-3:

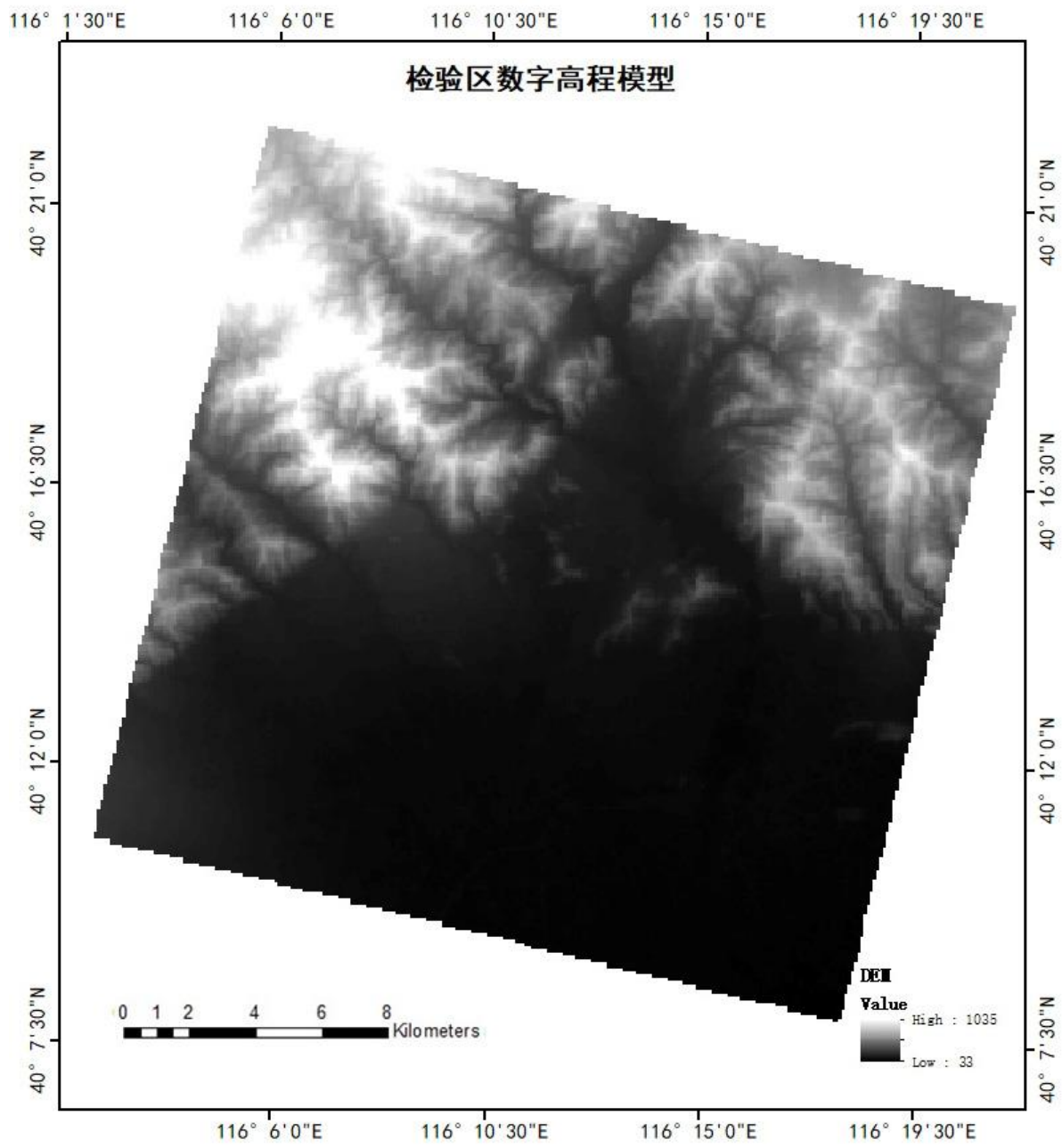


图 4-2 试验区域地形图

4.3.3 实验过程

(1) 计算检验点的中误差及均方根误差

首先需要在试验区域影像中选择地形图选择检验控制点的对应影像上的特征点，如图 4-3 所示：

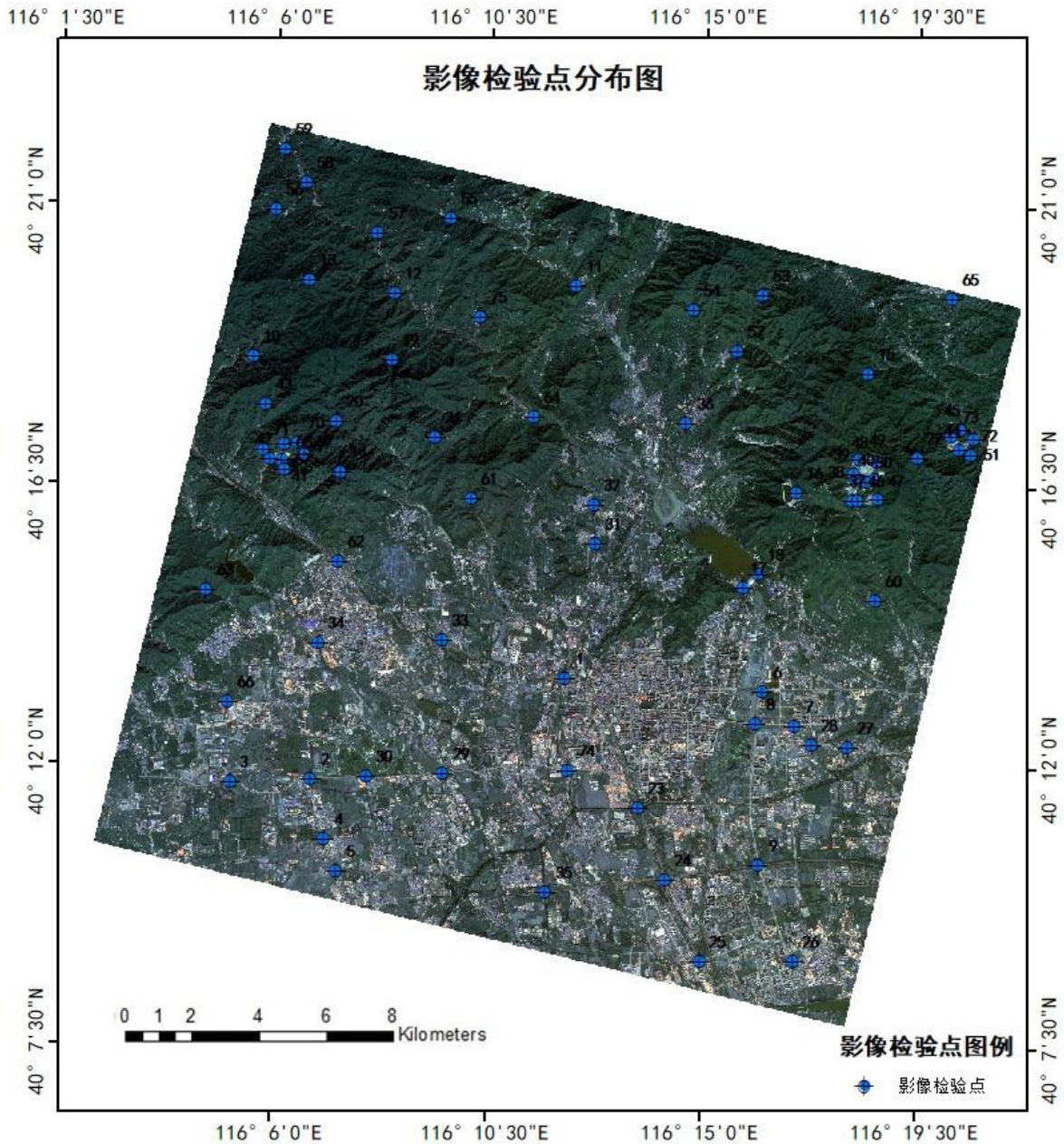


图 4-3 影像检验点分布图

然后将检验控制点的坐标和影像检验点的坐标分别输入 Excel 表格，进行检验点的点位中误差和均方根误差的计算。

(2) 计算矿区内的验证点的点位中误差

本实验为了验证矿区内的精度特地在矿区内选择了密度相对较大的验证点计算矿区内验证点的点位中误差和均方根误差，如图 4-4 所示：

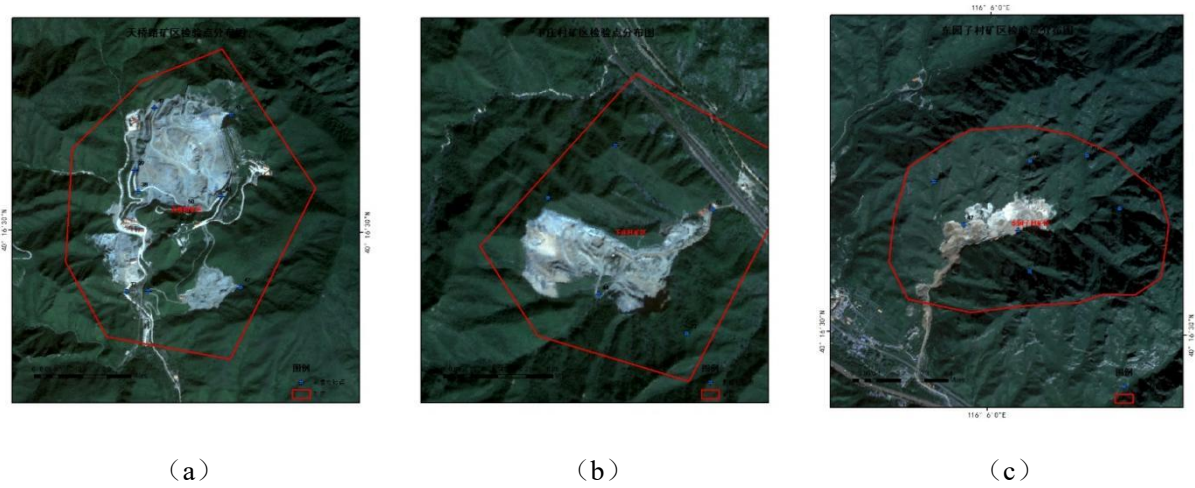


图 4-4 部分矿区内检验点分布图

通过 Excel 分别计算矿区内的检验点的点位中误差和均方根误差。

(3) 地形坡度计算与分级

通过试验区域的 DEM 可以计算区域内部的坡度，此步骤可以在 ArcGIS 中实现，如图 4-5 所示：

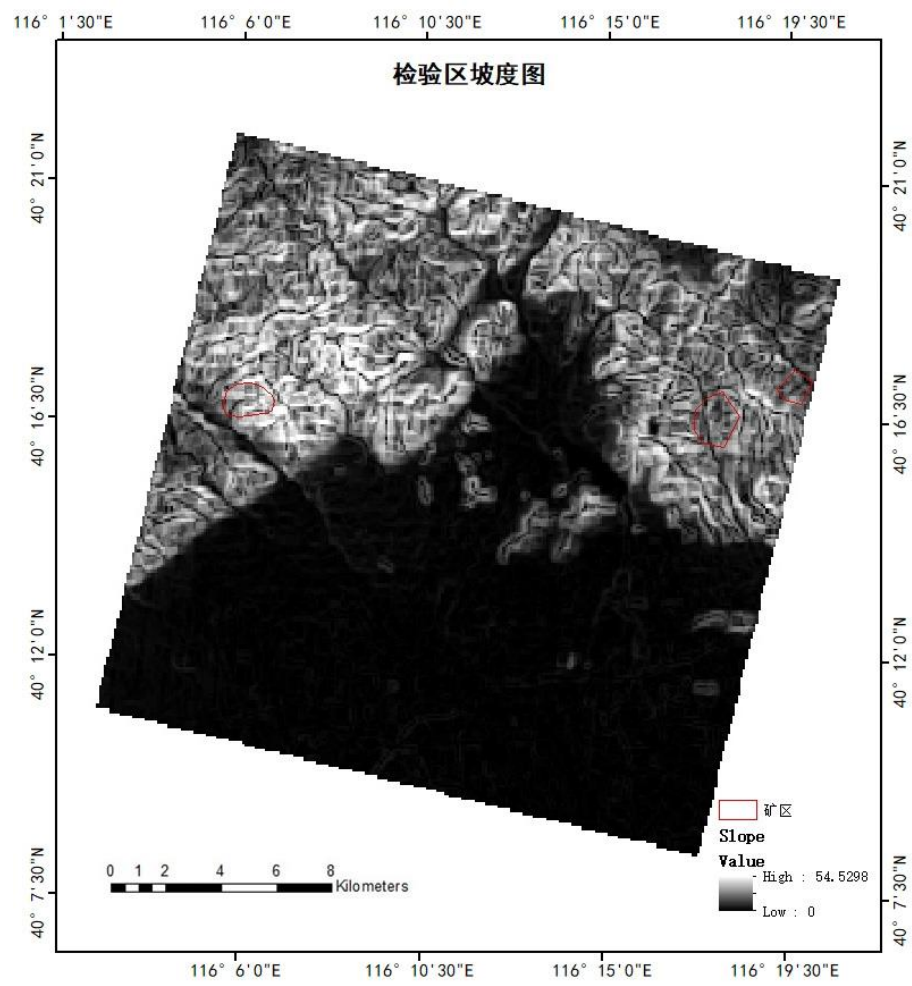


图 4-5 检验区的坡度图

从图中可以看出检验区域内的矿区都位于坡度较高的山地。

因此利用计算好的坡度影像进行坡度的分级，因为实验区域的南北地形比较突出，所以我们将坡度影像重分类为两个级别，坡度大于 13° 的分为山区，剩下的区域分类为平原，结果如图 4-6 所示：

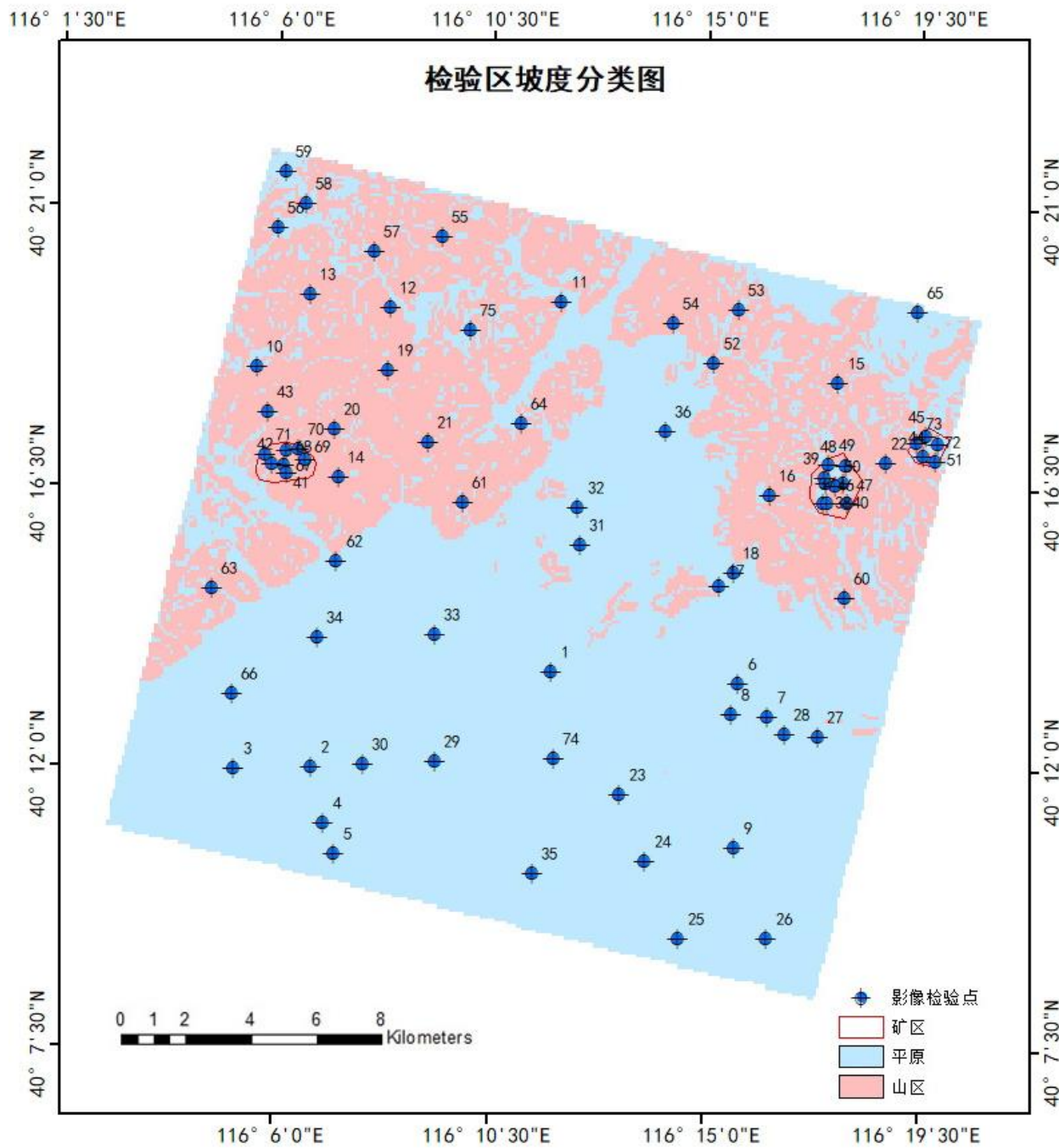


图 4-6 检验区的坡度重分类图

分类后统计各分区内的检验控制点的数量见表 4-1：

表 4-1 坡度分类后各分区内的检验控制点数量表

地形	检验控制点数量
平原	44
山地	31

从图中可以看出平原和山地面积的比里大约为 4:3，区域内的控制点的数量也为 4:3 且分布较为均匀。

然后通过 Excel 计算各自区域内的检验点的点位中误差和均方根误差。

(4) 计算全局莫兰指数和局部莫兰指数

莫兰指数的计算公式中 n 、 s_i 、 s_j 、 \bar{s} 都已经计算得出，只剩空间权重矩阵 w_{ij} 没有获得，可以通过反距离法得到空间权重矩阵，公式如下：

$$W = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{d_{1,2}} & \cdots & \frac{1}{d_{1,n}} \\ \frac{1}{d_{2,1}} & 0 & \cdots & \frac{1}{d_{2,n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{d_{n,1}} & \frac{1}{d_{n,2}} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

式中 $d_{i,j}$ 表示检验控制点 i 和 j 之间的质心距离，可以看出距离越远则空间的权重系数越小。

然后就可以在 ArcGIS 完成全局莫兰指数和局部莫兰指数的计算，如果局部莫兰指数计算出平原和山地出现了明显的中误差的聚集区域则可以分别计算每个区域内检验点的全局莫兰指数和局部莫兰指数查看不同地形内的检验点的中误差具体的分布情况，从而得到不同地形分区内的几何校正精度。

(5) 矿区几何校正的精度提高

如果矿区内的几何校正精度较低，可以结合局部莫兰指数的计算结果，调整检验点点位中误差分布相关性较大的区域内几何校正控制点的位置，在点位中误差较大的地形区域适当调整几何校正控制点的位置，并适当的增加或者删减区域内的几何校正控制点。重新进行几何精校正并计算整体的检验点的点位中误差和均方根误差，还有矿山局部的检验点的点位中误差和均方根误差。并重新进行检验点点位中误差的全局莫兰指数和局部莫兰指数的计算，查看检验点的点位中误差的整体的分布情况是否得到改善。

4.3.4 实验结果分析

(1) 检验点的中误差及均方根误差

经计算选择的 75 个几何校正精度检验点的均方根误差为: 0.5736 米, 部分精度检验点的点位中误差见表 4-2:

表 4-2 几何校正精度部分检验点的点位中误差

点号	$\Delta x, m$	$\Delta y, m$	S, m
1	0.2502	0.8158	0.8533
2	-0.2182	0.2249	0.3134
3	0.1587	0.0794	0.1775
4	-0.1218	-0.1879	0.2239
5	0.1005	0.1164	0.1538
6	-0.1482	-0.3175	0.3504
7	-0.291	-0.1058	0.3096
8	-0.0555	-0.0661	0.0863
9	-0.0761	0.0164	0.0778
10	-0.2765	0.1018	0.2946

注: 表中的 Δx 为几何校正精度检验点的点位横向误差, Δy 为几何校正精度检验点的点位纵向误差, S 为几何校正精度检验点的点位中误差, 后文中几何校正校正点的表格中符号的含义同本表格。

(2) 矿区内的验证点的点位中误差及均方根误差

经计算试验区内的三个主要矿区内的几何校正精度验证点的点位中误差和均方根误差结果:

a 天桥路矿区

天桥路矿区内 10 个几何校正精度验证点的均方根误差为: 0.8015 米比总体的校正精度要低, 矿区内的检验点的点位中误差也普遍偏高, 所有几何精度验证点的点位中误差见表 4-3:

表 4-3 天桥路矿区几何校正精度检验点的点位中误差

点号	$\Delta x, m$	$\Delta y, m$	S, m
37	0.5159	-0.5424	0.7486
38	-0.8812	0.6244	1.0799
39	-0.9657	-0.1799	0.9823
40	-0.8255	-0.8255	1.1674
46	-0.3968	-0.635	0.7488
47	-0.2143	0.2964	0.3658
48	-0.1985	0.6086	0.6404
49	0.1654	-0.3639	0.3997
50	0.1958	0.8889	0.9102
51	-0.2526	-0.4617	0.5263

b 下庄村矿区

下庄村矿区内 5 个几何校正精度验证点的均方根误差为：0.7038 米比总体的校正精度要低，矿区内的检验点的点位中误差也普遍偏高，所有几何精度验证点的点位中误差见表 4-4：

表 4-4 下庄村矿区几何校正精度检验点的点位中误差

点号	$\Delta x, m$	$\Delta y, m$	S, m
44	-0.9393	0.6455	1.1397
45	-0.3862	0.0026	0.3862
51	-0.2526	-0.4617	0.5263
72	-0.6800	-0.4471	0.8138
73	0.2116	-0.2117	0.2993

c 东园子村矿区

东园子村矿区内 7 个几何校正精度验证点的均方根误差为：0.6732 米比总体的校正精度要低，矿区内的检验点的点位中误差也普遍偏高，所有几何精度验证点的点位中误差见表 4-5：

表 4-5 东园子村矿区几何校正精度检验点的点位中误差

点号	$\Delta x, m$	$\Delta y, m$	S, m
41	-0.8572	-0.336	0.9207
42	-0.5742	0.4101	0.7056
67	-0.5027	-0.0861	0.5100
68	0.1587	-0.7144	0.7318
69	0.5820	0.1429	0.5993
70	0.2828	0.4798	0.5569
71	-0.5026	0.3308	0.6017

通过计算区域内所有的矿山区域内的几何校正精度发现影像内的矿上可能由于地形的影像，矿区内几何校正的检验点的点位中误差和均方根误差普遍偏低，需要进一步结合地形分区内的几何校正精度进行判断分析。

（3）地形分类后的几何校正精度分析

经计算经过地形分类后平原地区包含的 44 个几何校正精度验证点的均方根误差为：0.5310 米几何校正精度比总体影像要高，平原内所包含的部分几何精度验证点的点位中误差见表 4-6：

表 4-6 平原地区几何校正精度检验点的点位中误差

点号	$\Delta x, m$	$\Delta y, m$	S, m
1	0.2502	0.8158	0.8533
2	-0.2182	0.2249	0.3134
3	0.1587	0.0794	0.1775
4	-0.1218	-0.1879	0.2239
5	0.1005	0.1164	0.1538
6	-0.1482	-0.3175	0.3504
7	-0.291	-0.1058	0.3096
8	-0.0555	-0.0661	0.0863
9	-0.0761	0.0164	0.0778

山区包含的 31 个几何校正精度验证点的均方根误差为：0.6643 米几何校正的精度比

整体低，山区内所包含的部分几何精度验证点的点位中误差见表 4-7：

表 4-7 山区几何校正精度检验点的点位中误差

点号	$\Delta x, m$	$\Delta y, m$	S, m
11	0.3466	-0.1349	0.3719
12	-0.5688	-0.3771	0.682
13	-0.5424	0.5491	0.7718
14	-0.2315	0.2261	0.3236
15	-0.4603	-0.6721	0.8146
16	-0.2977	0.5622	0.6362
19	0.3307	-0.1984	0.3856
20	0.2289	-0.2156	0.3145
21	0.1693	-0.3704	0.4073

通过平原地区和山区内的几何校正精度检验点的点位中误差和均方根误差可以看出几何校正的精度受地形的影响较大，平原地区的几何校正精度普遍要高于山区的几何校正精度，试验区域的矿区都位于山区，结果证明矿区的几何校正精度偏低是因为收到地形的影响，为了探究影像内均匀分布的验证点的点位中误差是否存在相关性，进一步探究验证点的点位中误差可能存在较大的相关性的区域，需要进一步进行全局莫兰指数和局部莫兰指数的计算。

（4）全局墨兰指数计算结果

通过对试验区域内 75 个几何校正精度检验点的点位中误差进行全局莫兰指数的分析最后得到的结果见图 4-7：

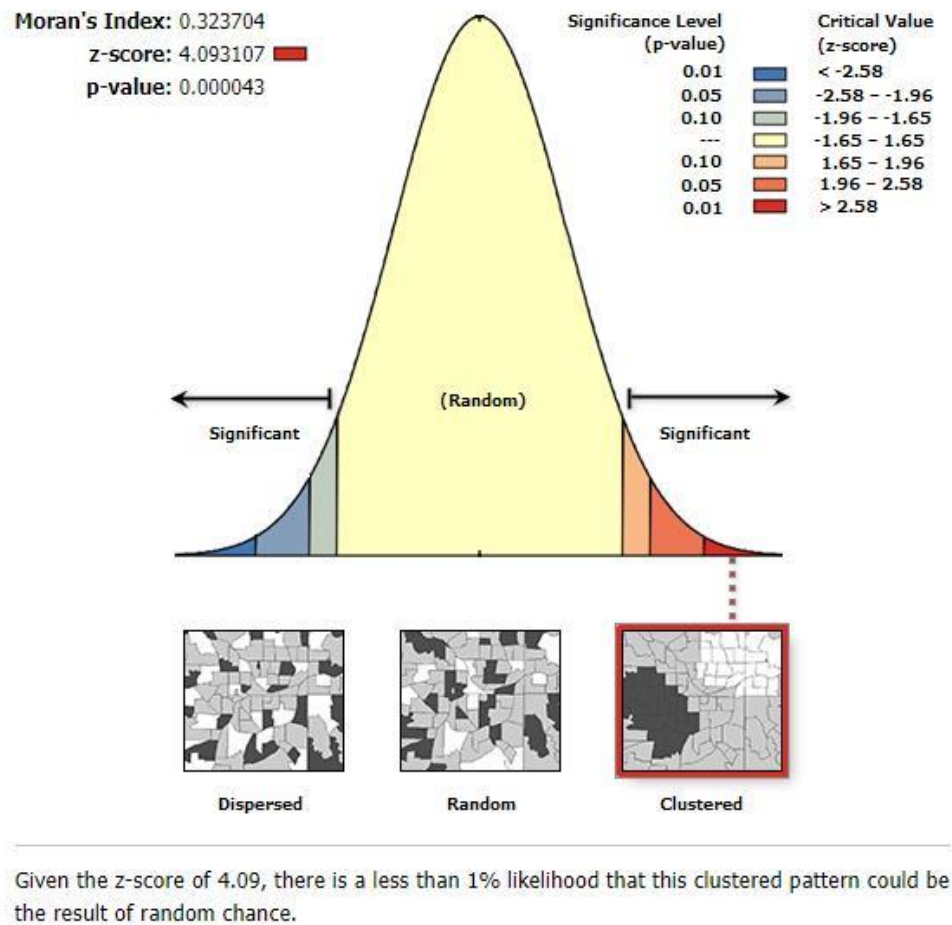


图 4-7 检验点点位中误差莫兰指数结果图

从图中可以看出分析得到的莫兰指数为：0.3337 说明检验点的点位中误差存在一定的空间相关性。进一步看分析结果的 z-score 为：4.093，z-score 代表的是标准差的倍数，结果中得到的大约就是 4.1 倍的标准差。分析结果的 p-value 为：0.000043，p-value 表示的是概率，对于本实验来说就是观测点的点位中误差分布是产生于随机过程的概率。全局莫兰指数的最终结果表示选择的 75 个检验点的点位中误差有百分之 1 的可能是随机的，也就是有百分之 99 的可能存在聚类分布的可能，证明检验点的点位中误差在空间上是有关联的，并且存在聚类分布。

实验结果表明检验点的点位中误差在空间上存在一定的聚类关系，进一步的证明地形可能对几何校正的精度存在一定的影响，这时就需要通过局部莫兰指数进一步的进行分析，查看具体的空间聚类分布情况。

(5) 局部莫兰指数计算结果

计算完全局莫兰指数后得到的结果是 0.3337，大于 0 小于 1，更接近于 0，综合 z-score 和 p-value 的结果表明影像整体的检验点的点位中误差可能分布比较均匀，但是在局部地区存在较为明显的强相关的关系，为了进一步探求验证点的点位中误差分布规律，进一步

进行了局部莫兰指数的计算分析，计算结果见图 4-8：

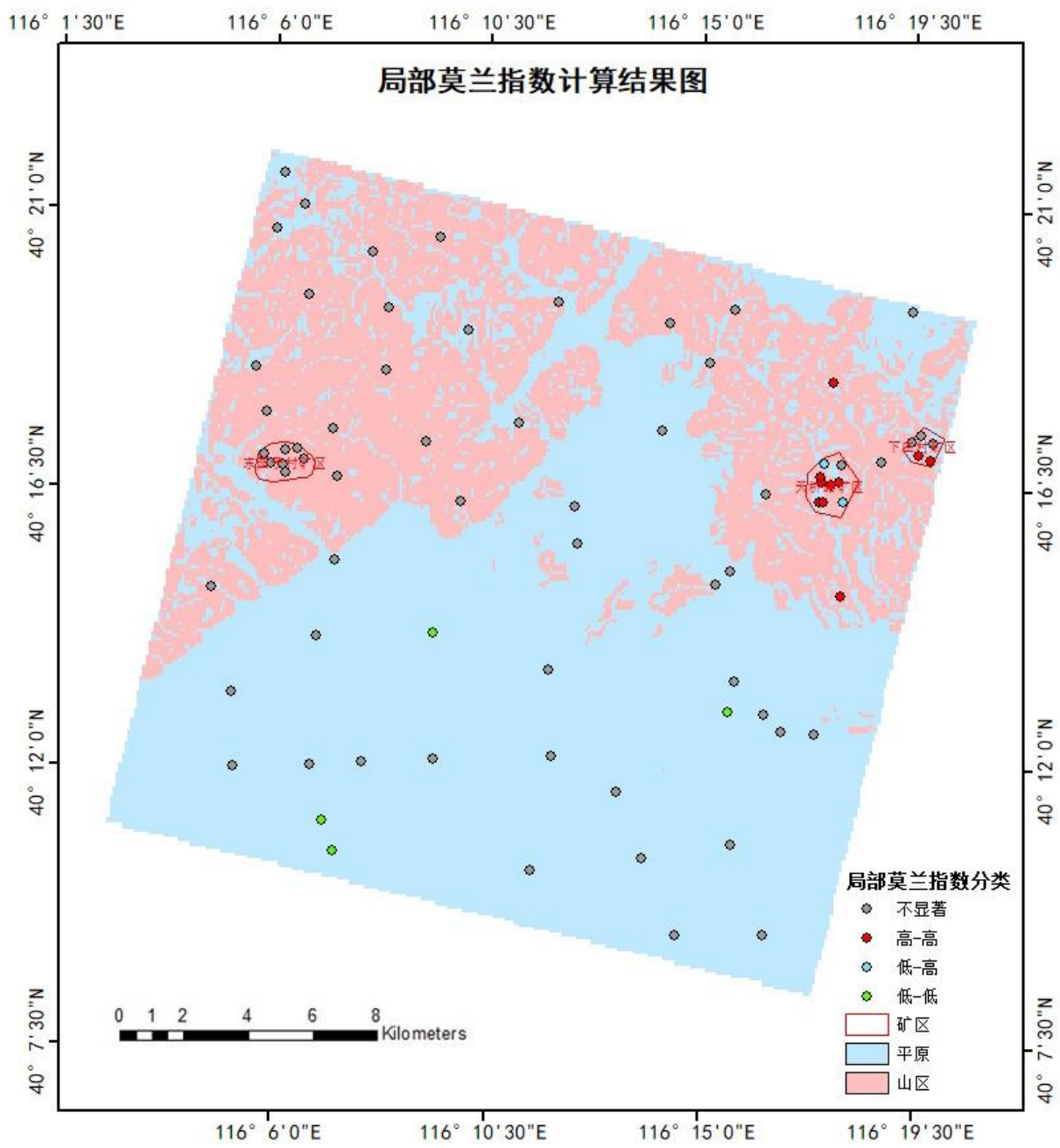


图 4-8 检验点点位中误差局部莫兰指数结果分布图

局部莫兰指数计算完成后检验点的局部莫兰指数显著为正且检验点的点位中误差与所有检验点的平均点位中误差的差为正值，表示检验点位于高-高聚集区，既检验点的点位中误差较高且周边的检验点的中误差也较高，表示检验点点位中误差较高的聚集区，如图中右上角的红色的点的区域；如果局部莫兰指数为负且检验点的点位中误差与所有检验点的平均点位中误差的差为负值，表示检验点位于低-高聚集区，既检验点的点位中误差较低但周边的检验点的中误差较高，表示检验点可能位于点位中误差较高的聚集区，如图中右上

角天桥路矿区内的两个局部莫兰指数计算结果为低-高的点；如果局部莫兰指数为正且检验点的点位中误差与所有检验点的平均点位中误差的差为负值，表示检验点位于低-低聚集区，既检验点的点位中误差较低且周边的检验点的中误差也较低，表示检验点点位中误差较低的聚集区，如图影像南部平原存在的几个局部莫兰指数计算结果为低-低的点。统计结果见表 4-8：

表 4-8 局部莫兰指数检验点统计表

地形	高-高	低-高	低-低	不显著
平原	0	1	4	39
山地	10	1	0	20

通过局部莫兰指数计算的结果图和地形分类后的结果可以看出，影像整体验证点的点位中误差分布较为均匀，但是在东北部山区受地形的影响导致东北部山区出现检验点中误差较高且有较高的空间相关性，导致东北部矿区内的几何校正精度较低，试验区域中三个主要矿区只有西部矿区内的检验点的点位中误差分布较为均匀。影像南部的平原地区，检验点的点位中误差分布较为平均，并且还可能存在零散的检验点点位中误差相对较低且误差分布相关性。从而可以得出几何校正精度一定程度上收到地形的影响。

（6）矿区内几何校正精度的提高

结合上述实验的结论，为了提高矿区内的几何校正精度，需要对点位中误差较高且分布相关性较强的区域内几何校正的控制点做出调整，并在山区适当的增删控制点，重新进行遥感影像的几何精校正。

针对试验区域内检验点点位中误差的分布情况，对像东北部山区内的几何校正控制点做出了调整，并重新进行几何精校正，然后在重新计算所有验证点的点位中误差和均方根误差，结果如下：

（a）检验点的均方根误差

重新进行几何校正后经计算选择的 75 个几何校正精度检验点的均方根误差为：0.4049 米，总体精度比之前有所提高

（b）矿区内的几何校正精度

重新进行几何校正后试验区内的三个主要矿区内的几何校正精度验证点的点位中误差和均方根误差结果：

1 天桥路矿区

天桥路矿区内 10 个几何校正精度验证点的均方根误差为：0.3247 米，矿区内的检验点的点位中误差比调整之前有明显的降低，所有几何精度验证点的点位中误差见表 4-9：

表 4-9 校正后天桥路矿区几何校正精度检验点的点位中误差

点号	$\Delta x, m$	$\Delta y, m$	S, m
37	0.0793	-0.2725	0.2838
38	-0.0874	0.2116	0.2289
39	-0.3492	-0.0741	0.3570
40	0.0158	-0.3969	0.3972
46	0.2303	-0.2460	0.3370
47	-0.2143	0.2964	0.3658
48	-0.0080	0.3546	0.3547
49	0.1654	-0.3639	0.3997
50	-0.0503	0.3174	0.3214
51	-0.3161	-0.3426	0.4661

2 下庄村矿区

下庄村矿区内 5 个几何校正精度验证点的均方根误差为：0.3566 米，矿区内的检验点的点位中误差比调整之前有明显的降低，所有几何精度验证点的点位中误差见表 4-10：

表 4-10 校正后下庄村矿区几何校正精度检验点的点位中误差

点号	$\Delta x, m$	$\Delta y, m$	S, m
44	-0.1773	0.3121	0.3589
45	-0.4179	0.0344	0.4193
51	-0.3161	-0.3426	0.4661
72	-0.1323	-0.2883	0.3172
73	0.2116	-0.2117	0.2993

3 东园子村矿区

东园子村矿区内 7 个几何校正精度验证点的均方根误差为：0.4278 米，矿区内的检验点的点位中误差比调整之前有明显的降低，所有几何精度验证点的点位中误差见表 4-11：

表 4-11 校正后东园子村矿区几何校正精度检验点的点位中误差

点号	$\Delta x, m$	$\Delta y, m$	S, m
41	-0.3333	-0.1667	0.3727
42	-0.2805	0.2355	0.3663
67	-0.3651	-0.0543	0.3691
68	0.2143	-0.5715	0.6104
69	0.3492	0.1112	0.3665
70	0.1081	0.3952	0.4097
71	-0.3333	0.2937	0.4442

从试验区域矿区内的几何校正精度结果来看，矿区内的整体的几何校正精度得到明显的提高，矿区内的几何校正检验点的点位中误差和均方根误差都得到了改善，甚至精度超过了影像总体的精度。可以进一步通过全局莫兰指数和局部莫兰指数查看检验点的中误差的分布情况有没有得到改善

(c) 全局莫兰指数

经计算重新进行完几何校正后试验区内 75 个检验点的点位中误差进行全局莫兰指数的分析最后得到的结果见图 4-9:

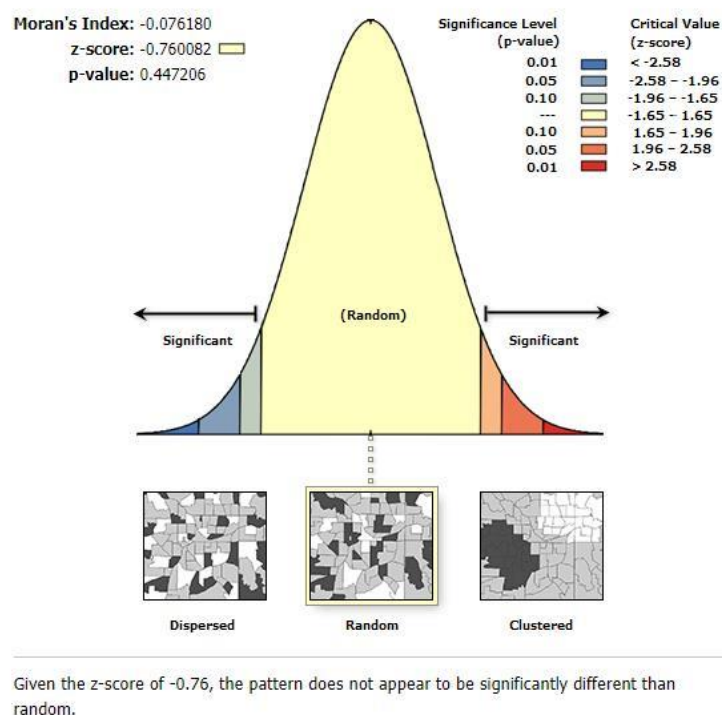


图 4-9 校正后检验点点位中误差莫兰指数结果图

从结果图中可以看出重新几何校正后的影像莫兰指数为: -0.0762, z-score 为: -0.7601, p-value 为: 0.4472。莫兰指数接近于零表示检验点的点位中误差的分布接近于随机, 几何校正的误差在整体的分布趋向于均匀。

可以通过局部莫兰系数来检验检验点点位中误差是否局部存在相关性较强聚类的区域, 查看点位中误差在具体空间内的分布情况。

(d) 局部莫兰指数

经计算重新进行完几何校正后试验区内 75 个检验点的点位中误差局部莫兰指数计算结果见图 4-10:

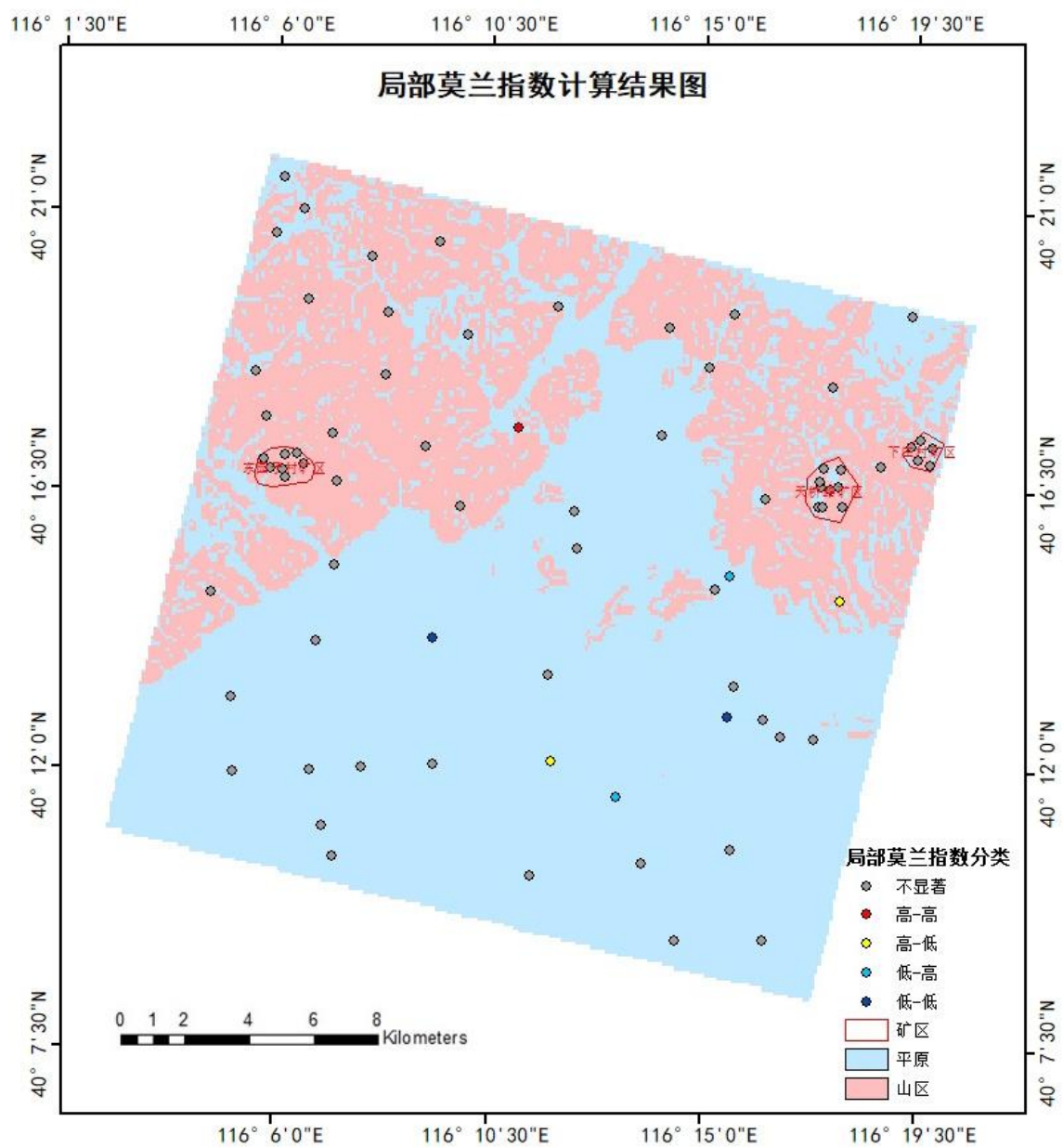


图 4-10 校正后检验点点位中误差局部莫兰指数结果分布图

通过对几何校正后的检验点点位中误差的局部莫兰指数结果图分析后，并对比图 4-8 发现：

影像中原来东北部的检验点点位中误差较高且分布相关性较大的区域，经过在区域内调整几何校正控制点的分布和数量重新进行几何精校正后，试验区域东北部的检验点点位中误差的分布趋向于均匀，矿区内的检验点点位中误差的分布也都趋向于均匀，几何校正的精度得到明显的提高。从整体来看，几何校正点的点位中误差在试验区域内的分布趋向于随机，没有明显的检验点点位中误差相关性较大的聚集区域，只有零散的分布的几个局部莫兰指数为高-高、高-低、低-高的点，在误差允许的范围之内。

总的来看本章提出的提高矿区几何校正精度的方法，通过结合全局莫兰指数、局部莫兰指数和地形的影响，可以对受到地形影响导致矿区的几何校正精度较低的矿区进行检测，并且找到具体几何校正误差分布的相关性较强的聚类位置，通过对几何校正误差较大且相关性较强的区域内的几何校正控制点的位置的校正或者增加或者删除几何校正控制点，从而达到提高区域内的几何校正的精度为目的。在矿山遥感等对细部几何校正精度要求较高的领域，如果经过检验发现矿区内几何校正精度较低，达不到要求，可以通过本方法来提高矿区整体的几何校正精度。

4.4 本章小结

本章首先介绍了几何校正精度评价模型，包括点位中误差、均方根误差、全局莫兰指数以及局部莫兰指数的模型，然后提出了一种提高矿区几何校正精度的方法，最后通过实验证明了影像几何精度评价的精度和效果以及提高矿区几何校正精度的方法的可靠性。

5 影像色调一致性评价

影像目前色调一致性的评价方法基本上都是基于整张影像的评价采用的方法，大多数采用直方图法，这种方法不适用于矿区内局部矿山地物色调的评价，而且对比起来较为麻烦，本章提出了一种矿区地物色调一致性评价方法可以简单方便的对矿区内地物的色调一致性进行检验。

5.1 色调一致性评价模型

5.1.1 灰度均值中误差

灰度均值的中误差反映了全部检验地物的灰度均值的离散程度，公式如下：

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}} \quad (5-1)$$

式中 Δ 为检验地物灰度均值的真误差， n 为检验地物样本的数量。

5.1.2 灰度均值极限误差

根据偶然误差的特性可知在一定的条件下，偶然误差的大小不会超过一定的界限，灰度均值的偶然误差也不会超过一定的界限，这个界限就是灰度均值的极限误差

极限误差是根据误差出现在某一范围的概率大小决定的，一般数值为中误差的整数倍，即误差出现在 $(-km, +km)$ 的概率。

一般误差出现在一倍中误差的概率为68.3%，误差出现在两倍中误差内的概率为95.5%，误差出现在三倍中误差的概率为99.7%。

5.2 矿区地物色调一致性评价方法

完成辐射精度评价和几何精度评价后，由于太阳高度和地形的影像没有完全消除，所以同类地物中可能会出现光谱反射值异常的情况，既“同物异谱”的现象。计算同类矿区地物的色调一致性可以找到同类矿区地物的色调异常的地物，并标记同个矿区内的地物，具体检验方法为：

- (1) 计算评价区域内全部目标地物的灰度均值
- (2) 计算评价区域内目标地物的灰度均值中误差
- (3) 设置两倍的中误差作为极限误差，筛选色调异常地物
- (4) 绘制分布结果曲线，查看色调一致性分布结果

5.3 实验结果及分析

5.3.1 研究区概况

实验的研究区域为北京市昌平区与第三章的研究区域完全相同。

由于数据获取的原因增加了浙江省全省作为验证组。

浙江界于东经 $118^{\circ}01' \sim 123^{\circ}10'$ ，北纬 $27^{\circ}02' \sim 31^{\circ}11'$ 之间，东临东海，南接福建，西与安徽、江西相连，北与上海、江苏接壤。

5.3.2 数据

(1) 高分二号卫星数据

本章实验中采用的高分二号卫星影像数据与第三章中采用的高分二号卫星影像数据相同。

(2) 矿区开采面数据

实验的矿区开采面数据昌平实验区域内的同第三章相同，浙江省内的开采面数据采用浙江省人工解译开采面数据如图 5-1：

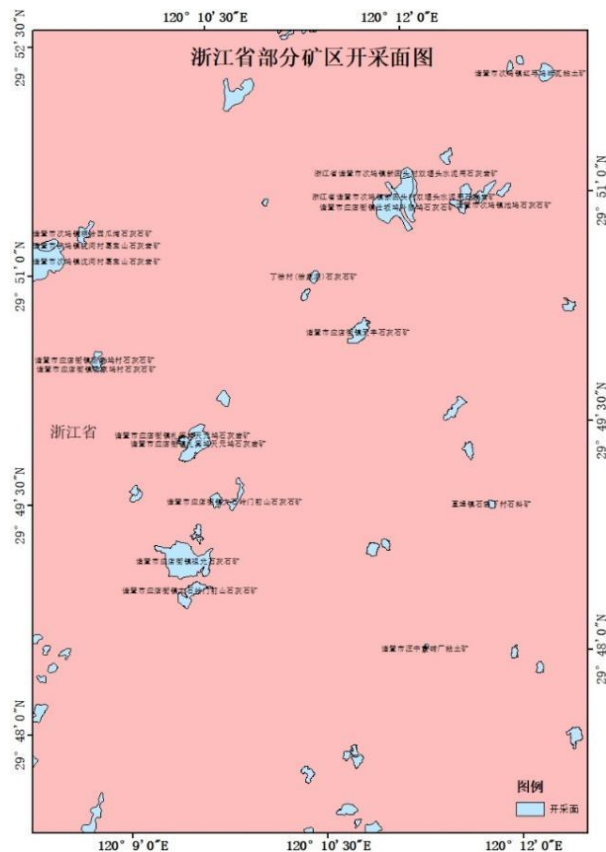


图 5-1 浙江省部分矿区开采面图

5.3.3 实验过程

(1) 计算昌平区试验区域内所有采石场开采面的平均灰度见图 5-2:

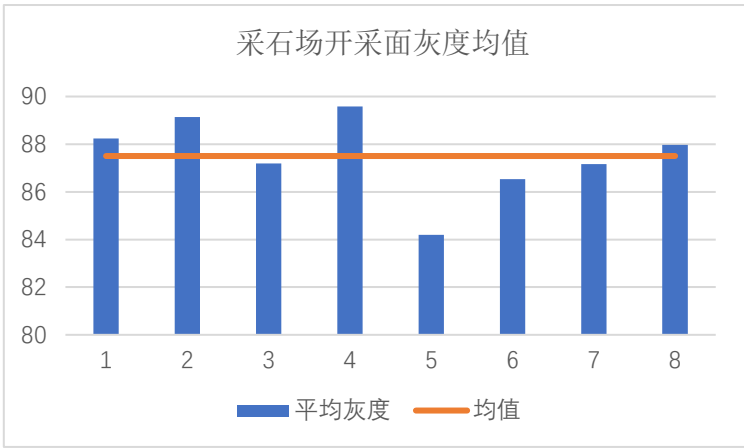


图 5-2 试验区采石场开采面平均灰度统计

图中每个蓝色的高度代表对应开采面的平均灰度，红线代表实验区域内所有开采面平均灰度的均值。

然后根据所有开采面的灰度均值计算灰度均值的中误差，然后统计超过一倍中误差的开采面个数及编号然后绘制误差分布曲线，查看误差分布情况。

(2) 计算浙江省内的全部采石场开采面的平均灰度来验证理论结果见图 5-3:

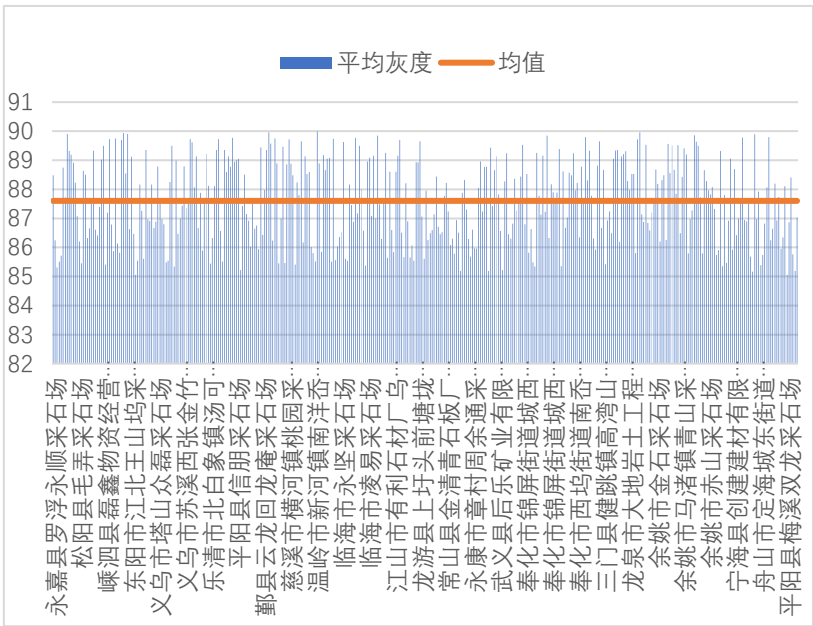


图 5-3 浙江省采石场开采面平均灰度统计

图中每个蓝色的高度代表对应开采面的平均灰度，红线代表实验区域内所有开采面平

均灰度的均值。

然后根据浙江省所有开采面的灰度均值计算灰度均值的中误差，然后统计超过一倍中误差的开采面个数及编号然后绘制误差分布曲线，通过大量样本，查看误差分布情况，完成矿山地物色调一致性检验。

5.3.4 实验结果分析

(1) 经计算昌平实验区内的所有采石场开采面的平均灰度为：87.5039，灰度均值的中误差为：1.5752，则符合一倍中误差的灰度均值取值范围是（85.9287，89.0791），从 5-3 图中可以看出 2 号、4 号、5 号采石场开采面的灰度均值都超出了限制，符合两倍中误差的灰度均值取值范围是（84.3535，90.6543），则只有 5 号开采面的灰度均值误差超限。

可以看出虽然经过了辐射校正和几何校正但是受到太阳角度和地形的影响还是无法完全消除，做不到真正的“同物同谱”所有相同的地物色调还是存在差距的，这样在分类中和计算中的精度都会受到影响，因此通过检验相同地物的色调对影像的生产使用具有很好的指导作用。因为检验的矿山地物都是经过人工人验证过的所以通过色调筛选出误差较大的地物，从而得到误差较大地物所在矿区内的整体地物色调可能存在较大偏差，为精度改正提供指导。

但是由于昌平区实验区域内的采石场开采面较少，北京市的开采面数据涉及到保密的原因，采用浙江省的开采面来增加样本进行计算，从而绘制概率密度曲线，查看误差分布情况，完成色调一致性的检验。

(2) 经计算浙江省内的所有采石场的开采面的平均灰度为：87.5912，灰度均值的中误差为：1.4079，符合一倍中误差的灰度均值取值范围是（86.1833，88.9992），370 个采石场开采面中有 111 个开采面灰度均值中误差超限，合格率为 70%，符合两倍中误差的灰度均值取值范围是（84.7754，90.4071），370 个采石场开采面中有 14 个开采面灰度均值中误差超限，合格率为 96.21%，所有采石场开采面灰度均值误差统计直方图和概率密度曲线如图 5-4 所示，最后根据计算出的中误差分别取一倍中误差和了两倍中误差作为极限误差完成对采石场开采面的色调一致性检查工作，结果见图 5-4：

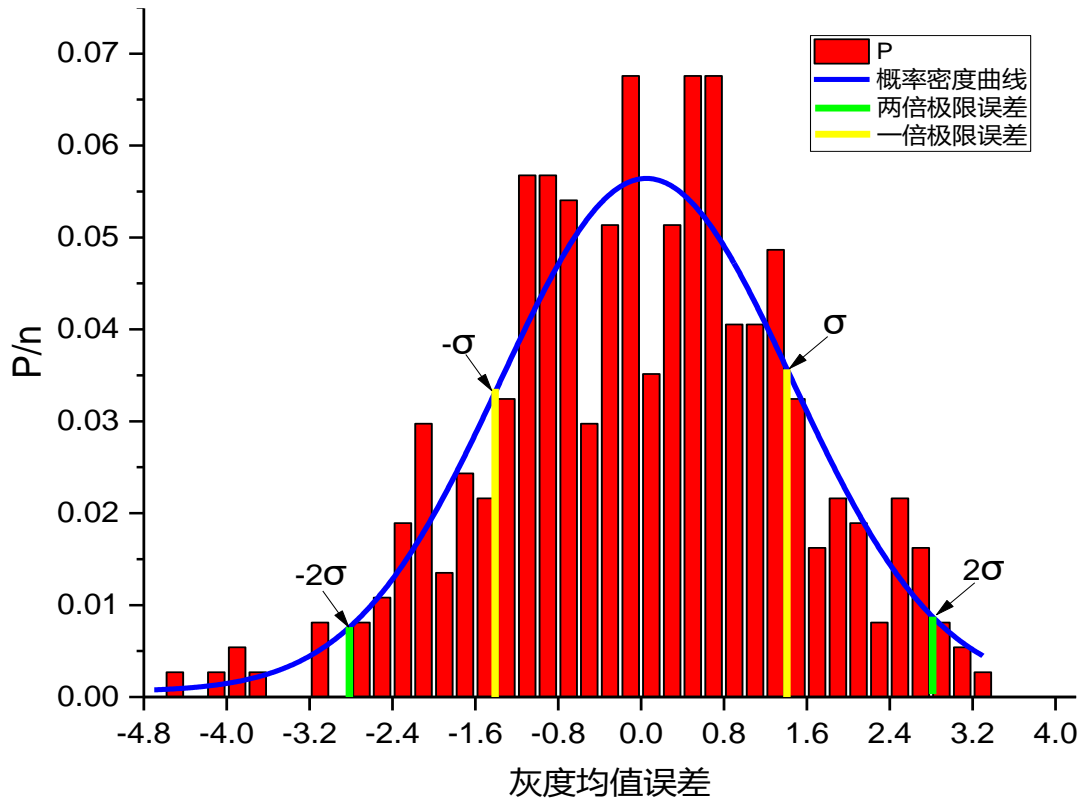


图 5-4 浙江省采石场开采面平均灰度极限误差分布情况

从图中可以看出浙江省开采面灰度均值的误差分布符合偶然误差的分布规律，误差分布趋向于正态分布，可以根据需求对采石场开采面进行筛选，如果需求要求较为严格则选取一倍的中误差作为极限误差在图 5-4 两条黄线间的开采面部分的影像可以直接使用，黄线外的可以进行人工检验进行进一步校正后使用，如果需求要求相对宽松则可以选择两倍中误差作为极限误差图 5-4 中两条绿线间部分的影像可以直接使用。

5.4 本章小结

由于经过几何校正和辐射校正后影像局部收到太阳角度和地形的影响并未完全消除，对于矿山遥感领域由于矿山的地势较为崎岖，可能存在部分矿山地物的色调出现异常情况，无法直接使用和计算，所以本章提出了色调一致性的评价方法，通过计算同种矿山地物灰度均值的中误差，然后设置极限误差，从而起到对矿山地物色调的控制，最后通过实验对理论进行了验证分析。

6 结论与展望

6.1 主要结论

本文主要针对矿山遥感等对遥感影像细部质量要求较高的行业提出了三种检验影像细部质量的方法，一种是检验影像细部辐射校正的精度，一种是检验影像细部几何校正的精度，还有一种是地物色调一致性，通过三个方面来衡量影像局部的质量，并最后通过三种方法有效的对北京市昌平区的高分二号影像中的矿山区域的影像质量作出了评价并且改进了矿山区域内影像的质量。

(1) 本文创新的提出了一种基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价方法，改进了传统的辐射校正质量评价都是以影像为基准进行整体评价的方法，通过统计实验区域内矿山的平均边长来确定影像分割单元的大小对整幅影像进行分割，然后对选定的 6 个辐射校正精度评价因子的评价结果进行模糊综合评价得到最后的辐射校正精度模糊综合评价结果。分析得到的结果可以综合得到矿山细部的辐射校正精度。最后发现基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价方法可以很好的反应影像细部的辐射校正精度，很好的反应了影像各个部分的辐射校正精度的分布情况。

(2) 本文还提出了一种提高矿区内几何校正精度的方法，首先对整张影像布设均匀的几何校正精度检查点，然后分别计算每个几何校正精度检查点的点位中误差和总体的均方根误差，然后计算每个矿区内的几何校正精度检查点的点位中误差和矿区内的均方根误差，然后进一步结合地形，结合区域内的坡度影像确定矿区所在的地形，计算不同地形分区内的几何校正精度检查点的点位中误差和区域内的均方根误差，查看是否是地形对几何校正的影响导致矿区内的几何校正精度偏低，然后在计算全部几何校正精度检查点的点位中误差的全局莫兰指数，检验影像内的几何校正精度检查点的点位中误差分布是否随机，然后再计算几何校正精度检查点点位中误差的局部莫兰指数，查看几何校正精度检查点点位中误差有没有表现出相关性较强的区域。此时就可以通过调整几何校正误差较大且相关性较强区域内的几何校正控制点的位置，并且对山区内的几何校正控制点的增删，从而达到提高几何校正误差较高且相关性较强区域的几何校正精度，并且不影响影像整体精度的目的。本文中通过此方法，遥感影像和矿区的几何校正精度都得到了一定程度的提高。

(3) 遥感影像在经过辐射校正和几何校正后太阳角度和地形误差带来的误差无法完全消除，在局部如矿山开采面可能会存在部分矿山地物色调异常的情况，因此本文在最后提出了进一步检验矿山地物色调的方法，首先计算试验区内所有同种矿山地物的灰度均值，

然后计算所有同种矿山地物的灰度均值的中误差，根据灰度均值中误差划分极限误差，根据设置的极限误差对地物色调进行筛选，色调误差合格的矿山地物可以为生产计算直接使用，色调误差超限的矿山地物需要进行标记，后续对存在问题的矿区内全部的矿山地物进行人工的检查。

6.2 创新点

（1）本文提出了一种基于 PixelBlock 分割的遥感影像辐射校正精度评价方法，很好的反应了影像各个部分的辐射校正精度的分布情况，对矿山遥感等对细部精度要求较高的行业的影像筛选工作具有指导作用。

（2）本文提出了一种结合地形和局部莫兰系数的提高矿区内几何校正精度的方法，合理的提高影像局部几何校正精度并且不对影像整体几何校正精度产生影响。

6.3 不足与展望

（1）试验区域内的矿山数量较少，后期需要多增加实验样本的数量进一步验证实验结论。

（2）在后续实验中可以补充同一地区不同时相影响的三种方法的检验结果作为补充实验，更好的验证本文中的精度检验模型。

（3）在影像色调一致性的评价中没有引入太阳入射角和太阳高度角来进一步对矿山地物进行分类，导致部分可能受太阳入射角和太阳高度角影响导致误差较大的矿山地物的错误分类，在后续的实验需要引入太阳入射角和太阳高度角的影响，进一步提高精度。

参考文献

- [1]. 潘腾.高分二号卫星的技术特点[J].中国航天,2015(01):3-9.
- [2]. 姜春山,王志伟,张旭晴,等.基础性地理国情监测遥感影像几何校正精度分析[J].测绘与空间地理信息,2020,43(10):105-107+115.
- [3]. 张亚妮,胡德勇,于琛,等.基于优化有理函数模型的高分辨率遥感影像几何校正及其精度评估——以ZY-3和Pléiades卫星数据为例[J].首都师范大学学报(自然科学版),2020,41(03):37-44.
- [4]. 陶万成,张永彬.控制点精度对遥感影像几何校正的影响[J].华北理工大学学报(自然科学版),2017,39(04):7-14+27.
- [5]. 陈光洲.遥感影像几何精校正中控制点选取的研究[J].现代测绘,2014,37(01):14-17.
- [6]. 白穆,张勤,吴晓春.资源三号影像质量及测图应用评价[J].测绘通报,2014(12):82-85.
- [7]. 魏宏伟,田庆久.HJ1B-CCD影像的质量评估及分析[J].遥感信息,2012,27(05):31-36.
- [8]. 王荣彬,李平湘,季宏伟,等.遥感影像的辐射质量评价方法[J].遥感信息,2015,30(02):10-16+49.
- [9]. 刘飒,王明志,吴亮,等.基于相关因素的遥感影像辐射质量度量模型研究[J].影像科学与光化学,2014,32(03):238-250.
- [10]. 杨帆,王超,张翰超,等.基于支持向量机的遥感影像辐射质量评价方法[J].测绘与空间地理信息,2017,40(11):12-14+19.
- [11]. 高永年,张万昌.遥感影像地形校正研究进展及其比较实验[J].地理研究,2008(02):467-477+484.
- [12]. 郑伟,曾志远.遥感图像大气校正方法综述[J].遥感信息,2004(04):66-70.
- [13]. 段四波,阎广建.山区遥感图像地形校正模型研究综述[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007(03):362-366.
- [14]. 汤竞煌,聂智龙.遥感图像的几何校正[J].测绘与空间地理信息,2007(02):100-102+106.
- [15]. 姜春山,张旭晴,杨国东,等.吉林一号卫星影像几何校正方法试验[J].测绘与空间地理信息,2020,43(08):208-211.
- [16]. 丁世飞,齐丙娟,谭红艳.支持向量机理论与算法研究综述[J].电子科技大学学报,2011,40(01):2-10.
- [17]. 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(09):1305-1325.
- [18]. A. M. Eskicioglu and P. S. Fisher, "Image quality measures and their performance," in IEEE Transactions on Communications, vol. 43, no. 12, pp. 2959-2965, Dec. 1995, doi: 10.1109/26.477498.
- [19]. R P Dewa, P Danoedoro. The effect of image radiometric correction on the accuracy of vegetation canopy density estimate using several Landsat-8 OLI's vegetation indices: A case study of Wonosari area, Indonesia[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 54(1).

- [20].Merrouche Saad,Andrić Milenko,Bondžulić Boban,et al. Objective Image Quality Measures for Disparity Maps Evaluation[J]. Electronics,2020,9(10).
- [21].Besma Sadou,Atidel Lahoulou,Toufik Bouden. PFF-RVM: A new no reference image quality measure[J]. Mathematics and Computers in Simulation,2020,167.
- [22].Patrick Kenny,David Costello,Dean McCarthy,et al. A novel quantitative measure of image quality in fluoroscopy[J]. Physica Medica,2020,71.
- [23].Adam Popowicz,Krystian Radlak,Krzysztof Bernacki,et al. Review of Image Quality Measures for Solar Imaging[J]. Solar Physics,2017,292(12).
- [24].A. Ghareeb,S.Z. Rida. Image quality measures based on intuitionistic fuzzy similarity and inclusion measures[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,2018,34(6).
- [25].Sinno Zeina,Moorthy Anush,De Cock Jan,et al. Quality Measurement of Images on Mobile Streaming Interfaces Deployed at Scale.[J]. IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society,2019.
- [26].Panetta, K.,Long Bao,et al. A human visual ldquo-no-referencerdquo image quality measure[J].IEEE Instrumentation & Measurement Magazine,2016,Vol.19(No.3):34-38.
- [27].Thanh Nguyen. Optimal Ground Control Points for Geometric Correction Using Genetic Algorithm with Global Accuracy[J]. European Journal of Remote Sensing,2015,48(1).
- [28].Zhu, Q. a , Li,et al. Accuracy assessment of TH-1 satellite image geometric correction using rational function model and polynomial model(Article)[J].Journal of University of Science and Technology of China,2013,Vol.43(No.2):110-114.
- [29].T. Gill,L. Collett,J. Armston,et al. Geometric correction and accuracy assessment of Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM imagery used for vegetation cover monitoring in Queensland, Australia from 1988 to 2007[J]. Journal of Spatial Science,2010,55(2).
- [30].E. Sertel,S. H. Kutoglu,S. Kaya. Geometric correction accuracy of different satellite sensor images: application of figure condition[J]. International Journal of Remote Sensing,2007,28(20) .
- [31].Takashi NONAKA, Koichi TSUKAHARA. Application of the geometric accuracy estimation model of the terrain corrected data to TerraSAR-X data[J].Journal of the Japan society of photogrammetry and remote sensing,2014,Vol.53(No.6):242-249.
- [32].Liu, Z.,Liu,et al. High-precision geometric correction of Tiangong-2 interferometric imaging radar altimeter(Conference Paper)[J].Lecture Notes in Electrical

Engineering,2019,Vol.541(No.6):104-111.

[33].郝建亭,杨武年,李玉霞,等.基于 FLAASH 的多光谱影像大气校正应用研究[J].遥感信息,2008(01):78-81.

[34].阿布都瓦斯提·吾拉木,秦其明,朱黎江.基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正[J].北京大学学报(自然科学版),2004(04):611-618.

[35].丁丽霞,周斌,王人潮.遥感监测中 5 种相对辐射校正方法研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2005(03):269-276.

[36].阮建武,邢立新.遥感数字图像的大气辐射校正应用研究[J].遥感技术与应用,2004(03):206-208.

[37].侯东,宋国宝,董燕生,等.TM 传感器辐射定标参数精度分析[J].国土资源遥感,2010(04):14-18.

[38].徐文,龙小祥,李庆鹏,等.“高分四号”卫星影像辐射与几何精度评价[J].航天返回与遥感,2016,37(04):16-25.

[39].张勇,戎志国,闵敏.中国遥感卫星辐射校正场热红外通道在轨场地辐射定标方法精度评估[J].地球科学进展,2016,31(02):171-179.

[40].肖艳芳,朱琳,赵文吉.HJ-1A 星辐射定标及近海水体大气校正的精度验证[J].海洋科学进展,2012,30(01):54-62.

[41].刘志丽,陈曦.基于 ERDAS IMAGING 软件的 TM 影像几何精校正方法初探——以塔里木河流域为例[J].干旱区地理,2001(04):353-358.

[42].邵鸿飞,孔庆欣.遥感图像几何校正的实现[J].气象,2000(02):41-44.

[43].赖震刚,王继.利用 ERDAS IMAGINE 进行影像的几何精校正[J].现代测绘,2003(02):38-40.

[44].朱倩,李霞,李少峰.基于有理函数模型和多项式模型的天绘一号影像几何校正精度评估[J].中国科学技术大学学报,2013,43(02):110-114.

[45].万里红,杨武年,李天华,等.浅谈 QuickBird 遥感卫星影像几何精校正[J].测绘与空间地理信息,2007(02):12-15+19.

[46].余树影,王海燕,韩鹏飞,等.浅谈遥感影像纠正方法及精度分析[J].测绘技术装备,2010,12(02):22-23+13.

[47].于博文,田淑芳.“高分一号”卫星数据几何校正研究[J].遥感技术与应用,2017,32(01):133-139.

[48].樊沛,黄文骞,于彩霞.TM 影像几何校正算法的精度比较[J].测绘科学,2008,33(06):103-104+62.

[49].秦永,孔维华,曹俊茹,等.基于 SVM 的遥感影像土地利用变化检测方法[J].济南大学学报(自然科学版),2010,24(01):88-90.

[50].刘佳,王利民,杨玲波,等.基于有理多项式模型区域网平差的 GF-1 影像几何校正[J].农业工程学

报,2015,31(22):146-154.

[51].赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].科学出版社:北京,2003年6月1日.

致谢

三年的研究生生活转眼间过去了，我也从一个刚了解测绘工程的大体内容的本科生，成长为一名能够熟练掌握地理信息系统原理和应用的硕士研究生了，三年的时间虽然很短暂，但是我过得很充实，能够走到今天顺利毕业，离不开我的家长、导师还有同学。

首先我要感谢我们伟大的祖国，我们出生在了一个好时代，没有国家强大的综合国力和国家好的政策我们不会有现在这么好的科研环境能够让我们静下心来专心学习。

非常感谢我的父母，他们给了我生命，是他们从小到大给了我一个健康的生活环境、良好的学习环境，才是我能够踏踏实实走到今天。

最需要感谢的一个人就是我的导师，付宗堂老师，他不仅教会了我们专业知识，更教会了我们做人做事的道理，付老师教给我们最宝贵的就是做人一定要勤奋，要脚踏实地搞科研。在学习科研中我们是师生关系，付老师勤勤恳恳的为我们传道授业解惑，在生活中我们更像是父子，付老师会细心的关心我们的生活琐事，付老师教给我的不仅仅是知识更是一颗强大的心！

我还要感谢我的师兄师姐，还有和我同级的同门同学，感谢他们在科研路上的一路的陪伴。

感谢我的室友同学，这三年大多数时光都是和室友一起度过的，我们相互帮助，相互鼓励，感谢室友的包容与善良。