

影像不同空间尺度对鲁甸植被分析的影响

石磊, 杨武年, 杨彦通, 陈平

(成都理工大学 国土资源部地学空间信息技术重点实验室/地球科学学院, 成都 610059)

摘要: 针对植被指数和植被覆盖度与遥感影像空间尺度的关系对高分辨率影像在植被分析中的运用具有重要影响的问题, 该文提出一种确定最佳分辨率的方法。以云南鲁甸县茨院乡为研究区, 先对原始影像(Worldview-2)进行重采样处理, 生成一系列低分辨率影像; 计算 13 组数据的 NDVI 并利用像元二分模型反演出植被覆盖度; 运用信息熵理论和按照局部方差的思路等两种方法, 定量分析该区植被分析的最佳分辨率。实验结果表明, 随着空间分辨率的降低, NDVI 值域区间呈现收敛趋势; 植被覆盖度分级图斑斑块数量急剧减少, 而所占面积比则保持相对平稳; 信息熵中的信息量也随之减少。分析结果认为, 该区进行基于 Worldview-2 影像植被分析的最佳空间分辨率为 12 m。

关键词: Worldview-2; NDVI; 植被覆盖度; 信息熵; 局部方差

【中图分类号】 P236

【文献标志码】 A

【文章编号】 1009-2307(2017)03-0064-06

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2017.03.012

The effect of Worldview-2's spatial-scaling on vegetation analysis in Ludian county

Abstract: Research on the relationship among vegetation index, vegetation coverage and remote sensing image resolution is significant to the rational use of high-resolution image in vegetation analysis. In the light of the relationship among the three which are mentioned above, a new way is proposed to determine the best resolution in this paper. The paper selects Ciyuan village, Ludian County of Yunnan Province as the study region. The original image, Worldview-2, with fine resolution is degraded to successively coarser resolutions by resampling to calculate the Normalized Difference Vegetation Index(NDVI) and vegetation coverage of 13 groups data respectively. Based on the methods described above, referencing the two methods: the theory of entropy and the thought of local variance, this paper runs the quantitative analysis of the best fitting Worldview-2 image resolution in this study region. According to the research, the paper comes to the following conclusions. Firstly, as the resolution becoming coarser, the statistics interval of NDVI presents a narrowing trend, numbers of map patches in each classification of vegetation coverage decrease rapidly, area proportion of each classification remains stable and information entropy contents come reducing. Secondly, also the most important conclusion of the quantitative analysis in this paper is the best fitting Worldview-2 image resolution of vegetation analysis in the study area is 12 m.

Keywords: Worldview-2; NDVI; vegetation coverage; information entropy; local variance

SHI Lei, YANG Wunian, YANG Yantong, CHEN Ping (Key Laboratory of Geoscience Spatial Information Technology, Ministry of Land & Resources of the P. R. China/College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)



作者简介: 石磊(1988—), 男, 四川崇州人, 硕士研究生, 主要研究方向为地图制图学与地理信息工程。

E-mail: 414631015@qq.com

收稿日期: 2015-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372340); 国土资源部地学空间信息技术重点实验室基金项目(KLGST2014-05); 高等学校

博士学科点专项科研基金课题项目(20105122110006, 201351221200092013)

通信作者: 杨武年 教授/博导 E-mail: ywn@cdu.edu.cn

0 引言

植被在地球表面占有很大的比例, 陆地表面的植被常是遥感观测和记录的第一表层, 是遥感数据感应的最直接的信息, 也是人们研究的主要对象^[1], 其分布主要受到自然和人类活动的共同影响。获取地表植被覆盖信息, 可为植被变化趋势、土壤侵蚀等方面提供重要的数据支持。我国领土面积广阔, 植被种类丰富, 巨大的植被规模使得在获取地表植被覆盖信息的过程中, 传统的人工作业方法显得耗时耗力, 且精度较低。

随着遥感技术、理论的不完善和成熟, 植

被分析对遥感数据的引入对大区域的植被研究提供了技术和数据支撑。同时遥感平台和传感器的多样性, 也为人们提供了不同空间尺度的遥感影像数据, 因此研究空间尺度对植被分析的影响和如何选择适当的空间尺度数据有着重要的意义。目前, 已有许多学者对此问题进行了大量研究^[2-11], 文献^[12]将不同时段的 TM 影像数据进行重采样并计算出研究区域景观指数统计值, 发现景观指数随空间分辨率的降低出现明显变化; 文献^[13]提出用局部方差来探讨不同地物类型的最佳分辨率; 文献^[14]将 TM 影像重采样得到的覆盖度与 MODIS 反演得到的覆盖度进行对比, 确定引起植被覆盖尺度效应的原因; 文献^[15]充分利用了遥感影像的多光谱信息, 并考虑了影像的空间分布特征, 提出一种基于可分性信息熵最优空间尺度选择方法。

本文使用 Worldview-2 影像作为数据源, 在前人研究的基础上, 以鲁甸县重点乡镇茨院回族乡为研究区, 提取出多种空间尺度的影像数据。通过分析不同空间分辨率对植被分析的影响, 研究出该区域进行植被提取的最适宜空间尺度。

1 研究区域及方法

1.1 研究区概况

鲁甸县位于云南省东北部, 牛栏江北岸, 昭通市西南门户要冲, 地处乌蒙山南麓, 史称小乌蒙。下辖 1 镇 13 乡。位于东经 $103^{\circ}09' \sim 103^{\circ}40'$ 、北纬 $26^{\circ}59' \sim 27^{\circ}32'$ 之间。全县国土面积 $1\,489\text{ km}^2$, 境内海拔 $568 \sim 3\,356\text{ m}$, 属低纬山地季风气候, 年平均气温 $12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量 924 mm , 雨热同季, 干湿季分明, 四季温差较小。

本文以鲁甸县茨院回族乡为研究区进行研究。茨院乡东西横距 15.7 km , 南北纵距 12.2 km , 国土面积 42.51 km^2 , 平均海拔 $1\,910\text{ m}$, 年平均气温 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年降水量 912 mm 。

1.2 数据获取与处理

本文选用 Worldview-2 高分辨率遥感影像为原始数据源。Worldview-2 卫星是 Digitalglobe 公司于 2009 年 10 月发射升空的高分辨率商业卫星, 提供了 1 个分辨率为 0.5 m 的全色图像和 8 个 1.8 m 分辨率的多光谱图像。

研究过程中, 首先对原数据进行辐射校正、波段融合等预处理, 拼接裁剪出研究区域, 进而将数据重采样出 12 组不同空间尺度的数据, 同融合后的 0.5 m 原始数据构成 13 组不同分辨率的数

据; 然后采用新增的近红外 2 波段计算 NDVI, 并使用像元二分模型反演植被覆盖度; 最后, 通过信息熵和局部方差两种方法进行定量分析, 进而判断出茨院回族乡植被提取的 Worldview-2 影像最佳空间分辨率。

2 植被指数提取

2.1 归一化植被指数

归一化植被指数 (NDVI), 又称标准化植被指数, 它是植被发育状态以及植被覆盖稀疏程度的最佳指示因子, 也是单位像元内的植被种类、覆盖特征、生长状况等的指标值, 与植被分布密度呈线性相关。

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IR} - R}{\text{IR} + R} \quad (1)$$

式中: IR 为遥感多波段图像中的近红外波段; R 为红光波段, 取值范围为 $[-1, 1]$ 。

对原数据波段进行研究可以发现, Worldview-2 卫星传感器新增的 4 个波段中, 受大气层影响较小的近红外 2 波段 ($860 \sim 1\,040\text{ nm}$) 与近红外波段 ($770 \sim 895\text{ nm}$) 发生重叠, 且该新增波段支持植被分析和单位面积内生物数量的研究。因而本文在对 NDVI 的求算过程中, 用近红外 2 波段替换近红外波段。

$$\text{NDVI}_2 = \frac{\text{IR}_2 - R}{\text{IR}_2 + R} \quad (2)$$

2.2 植被覆盖度

植被覆盖度 (vegetation coverage), 又叫植被盖度, 是指冠层的垂直投影面积与土壤总面积之比, 是衡量植物群落覆盖地表状况的一个综合量化指标, 是描述植被群落及生态系统的重要参数。用 NDVI 反演植被覆盖度的基本原理是根据植被和土壤对不同波段的差异性反应来进行的。本文采用广泛使用的像元二分模型来反演植被覆盖度^[16]。

$$f_c = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (3)$$

式中: NDVI_{\min} 和 NDVI_{\max} 分别对应 $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 和 NDVI_{veg} , 即 NDVI 的最小值与最大值。本研究中将 NDVI_{\min} 和 NDVI_{\max} 置信区间设置为 $3\% \sim 97\%$ ^[17]。

2.3 数据分析

2.3.1 NDVI 数据分析

分析表 1 中汇总信息可以发现, 随着空间分辨率的降低, 各空间尺度的 NDVI_2 取值区间呈现缩小的趋势, 即最大值不断降低, 最小值不断增大。当分辨率为 64 m 时, NDVI 取值范围相比 0.5 m 时减少将近一半。特别地, 2 m 和 4 m 的最大值与 12 m 的最大值相等; 16 m 最小值则大于 24 m 最

小值,这是由于在对数据进行重采样的过程中,信息的丢失是随机的,因此,不论是峰值、中间值还是谷值,其丢失的概率相同,因而均值并未出现明显变化。

表 1 遥感影像不同分辨率的 NDVI₂ 信息

Tah 1 The NDVI₂ Information of Different Resolution RS Images

空间分辨率/m	最大值	最小值	均值	标准差
0.5	1.000 0	-0.992 9	0.111 3	0.154 7
1	1.0000	-0.939 0	0.111 2	0.154 6
2	0.954 3	-0.992 9	0.111 7	0.155 0
4	0.954 3	-0.672 3	0.111 1	0.154 3
8	0.918 5	-0.890 0	0.111 0	0.154 2
12	0.954 3	-0.443 5	0.111 1	0.154 3
16	0.820 8	-0.402 6	0.110 8	0.154 0
20	0.814 5	-0.405 7	0.111 0	0.154 5
24	0.868 2	-0.432 0	0.110 9	0.154 2
28	0.787 8	-0.386 7	0.111 0	0.154 5
32	0.863 8	-0.355 1	0.111 1	0.154 0
48	0.764 7	-0.360 0	0.111 8	0.154 5
64	0.777 0	-0.352 1	0.112 0	0.155 6

理论上,随着对比度降低,图像能够提取出的信息相应减少,反映图像对比度的标准差则应随着之减小^[18]。但由于本文的不同分辨率数据来自原始数据的重采样,而非不同传感器的不同分辨率遥感影像,受算法和数据丢失概率的影响,因而出现的标准差变化有起有伏(图 1)。

2.3.2 植被覆盖度数据分析

本研究根据水利部相关文件将植被覆盖度分为 5 个等级,其分级图如图 2 所示,分级图斑数量和面积比如表 2 所示。从表 2 中可以发现,各图斑面积比虽然产生波动,但基本保持稳定。这说明在 5 个等级中,均存在较大图斑,因而在重采样的计算过程中,没有发生等级消失的现象。而如果对等级标准进行细分,那么面积比重较小的类别将在重采样过程中因并入其他类别而消失,从而必然引起其余类别的面积比发生变化。因此,可以

认为面积比为空间分辨率度的一个相关指标,且对分辨率敏感性低。

从图 2 的对比图中也可以直观的看到,图斑的数量对分辨率敏感性较高。随着空间分辨率的增大,图斑数目一开始急剧减少,在低分辨率时下降趋势则趋于平缓。这说明各等级中小图斑数量占了多数,而重采样对小图斑的合并导致了这一现象。

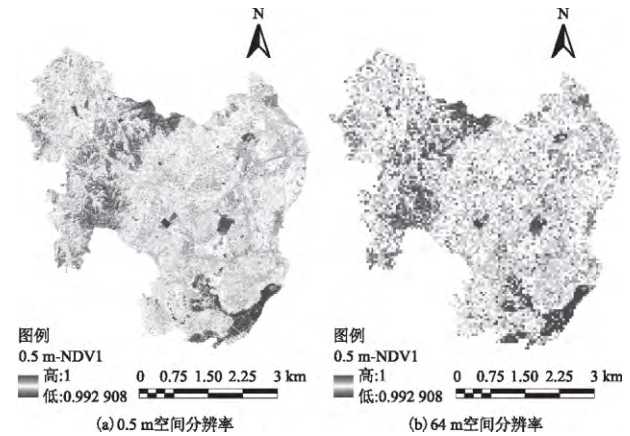


图 1 两种不同分辨率影像的 NDVI 信息对比图

Fig 1 Comparison of NDVI between Two Different Spatial Resolution Images

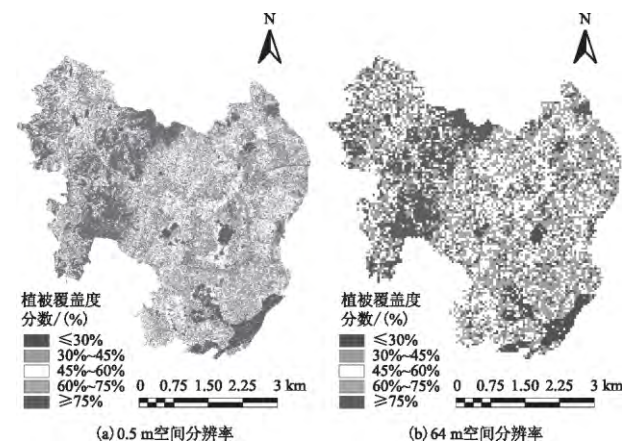


图 2 两种不同分辨率影像的植被覆盖分级对比图

Fig 2 Comparison of Vegetation Coverage between Two Different Spatial Resolution Images

表 2 植被覆盖分级图斑数量、面积比随尺度变化情况

Tah 2 The Changing of Number, Area Proportion of Patches according to Scale

空间 分辨率/m	≤30%图斑		30%~45%图斑		45%~60%图斑		60%~75%图斑		≥75%图斑	
	斑块	面积比	斑块	面积比	斑块	面积比	斑块	面积比	斑块	面积比
	数量/个	例/(%)	数量/个	例/(%)	数量/个	例/(%)	数量/个	例/(%)	数量/个	例/(%)
0.5	143 764	6.88	324 907	24.72	481 127	29.12	395 433	19.47	165 191	19.81
1	105 928	6.78	247 479	23.78	368 586	29.50	322 194	19.80	126 293	20.13
2	68 071	6.98	160 994	27.12	300 615	28.07	277 926	18.40	91 356	19.42
4	29 761	6.83	75 732	24.18	126 747	29.54	117 354	19.48	51 187	19.97
8	10 464	6.96	27 073	24.71	41 516	29.21	38 953	19.16	21 024	19.97

续表

空间 分辨率/m	≤30%图斑		30%~45%图斑		45%~60%图斑		60%~75%图斑		≥75%图斑	
	斑块	面积比	斑块	面积比	斑块	面积比	斑块	面积比	斑块	面积比
	数量/个	例/(%)	数量/个	例/(%)	数量/个	例/(%)	数量/个	例/(%)	数量/个	例/(%)
12	5 423	6.95	14 932	24.54	20 963	29.21	20 031	19.24	11 634	20.05
16	3 212	6.93	9 641	24.37	12 674	29.17	12 316	19.48	7 418	20.05
20	2 302	7.08	6 772	24.81	8 572	29.50	8 233	19.00	5 109	19.60
24	1 678	7.12	5 053	25.57	6 331	28.84	5 908	18.72	3 882	19.75
28	1 269	7.05	3 874	24.84	4 702	29.07	4 507	19.31	2 944	19.73
32	940	6.99	3 089	25.29	3 709	28.96	3 519	18.74	2 271	20.03
48	471	7.08	1 571	25.59	1 753	28.52	1 666	18.76	1 092	20.05
64	281	7.05	908	23.89	1 037	29.68	1 028	19.51	667	19.88

3 最佳空间尺度的定量选择

遥感影像的最佳尺度随着研究内容、目的和图幅内地物特征的不同而发生改变。确定最佳尺度的方法需要符合两个条件：①能最大限度的反映地物的空间分布特征；②在满足条件一的前提下使得空间分辨率最小^[19]。

3.1 基于信息丰富度的信息熵

信息熵是对随机信号不确定性的度量，也是度量影像信息丰富度的重要指标。熵越大，不确定性越高，影像可分性越低，将其描述清楚所需的信息量亦越大。那么根据 C. Shannon 的信息论，熵的表达式可以定义式(4)。

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (4)$$

式(4)是信息熵计算的基本公式，X 表示一个随机变量； $p(x_i)$ 是随机信号发生概率。

对一幅灰度图像，当其像素在各灰度级均匀分布，即出现的概率相同(均为 $1/n$)，这时候信息熵值最大($\log_2 n$)，图像所包含的信息量也是最多，灰度级也最多。

从图 3 可以看出，在分辨率为 0.5~12 m 区间范围内，植被覆盖度信息熵保持平稳，波动不太明显；随后，曲线在分辨率 12 m 处出现拐点，呈现逐渐下降的趋势。可以判断，该研究区植被分析的最佳空间分辨率区间为 0.5~12 m；同时，随着栅格像元的增大，其包含的信息量逐渐减少，因此度量植被覆盖度信息量的信息熵值也随之减小。

3.2 局部方差

局部方差法(local variance)是 Woodcock 和 Strahler 提出的针对单波段灰度影像图，用局部方差来确定图像最优尺度的一种纹理分析方法，用于计算不同空间尺度地物之间的相互关系。

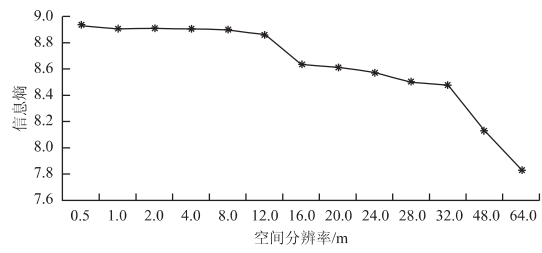


图 3 植被覆盖度信息熵统计图

Fig 3 The Information Entropy Statistical Graph of Vegetation Coverage

如图 4 所示，该方法的理论基础^[20]为：当空间分辨率为 a 时，像元大小小于目标地物，相邻像元空间相关性较高，方差值较低；当空间分辨率为 b 时，像元大小与目标地物大小相似，相邻像元空间相关性降低，方差值升高达到峰值；当空间分辨率为 c 时，开始出现混合像元，相邻像元相关性再次增加，方差值随即下降。即当空间尺度近似于研究对象大小时，局部方差的变化趋势线会出现一个峰值，该峰值对应的空间分辨率则可以认为是该区域的最适合尺度。在图 4 中，空间分辨率 b 即为该区域的最佳空间尺度。因此，计算同一区域不同分辨率遥感影像的局部方差，可以判断出研究区的最佳空间尺度。

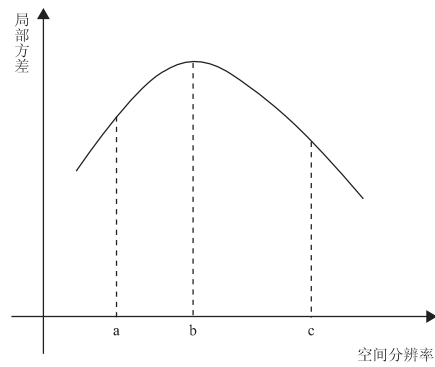


图 4 遥感影像空间分辨率与局部方差关系图

Fig 4 Schematic Curve of Relationship between Spatial Resolution and Local Variance

在局部方差的求算过程中, 首先会设置一个 $(2n+1) \times (2n+1)$ 的窗口, 通过不断移动该窗口来计算窗口内的所有像元的方差。

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} |f(k, l) - u_{ij}|^2 \quad (5)$$

式中: σ_{ij}^2 为窗口中心像元 (i, j) 的局部方差; u_{ij} 为窗口所有像元灰度均值。

然后, 对像元的所有局部方差求均值, 则所求遥感影像的局部方差如式(6)所示。

$$\sigma^2 = \frac{1}{(L-2n) \times (M-2n)} \sum_{i=n+1}^{L-n} \sum_{j=n+1}^{M-n} \sigma_{ij}^2 \quad (6)$$

式中: σ^2 为影像的局部方差; L 、 M 分别为影像的栅格行列数。

对不同波段而言, 空间分辨率不同, 则局部方差不同, 因而不同波段对最优尺度的选择也不尽相同。对进行植被分析的两个波段进行局部方差的计算, 得到图 5。

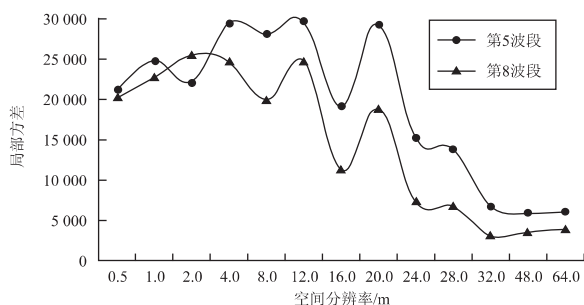


图 5 不同波段局部方差随空间尺度变化图

Fig 5 Local Variance as A Resolution Function of the Different Band Images

由图 5 可以发现, 本研究中用于植被指数提取的第 5 波段(红光波段)在分辨率为 2 m、4 m、12 m 处均为理想的最佳尺度区间; 而第 8 波段(近红外 2 波段)则在 4 m、12 m 和 20 m 分辨率时出现峰值, 可以认为此 3 处分辨率是该波段的适合尺度。

植被覆盖度的计算中, 上述两个波段均需带入公式进行计算, 因而预判最佳分辨率可能出现在两个波段的峰值交集——12 m 分辨率处; 同时, 由于经由信息熵推出的最佳分辨率区间为 0.5~12 m, 所以, 12 m 分辨率作为该区域植被分析最适宜尺度具有较高的可能性。

图 6 的趋势线是由研究区通过三次卷积法重采样所得不同分辨率图像计算反演植被覆盖度的局部方差值连接而成。结合图中趋势线走势可以发现, 在空间分辨率为 12 m 处, 其植被覆盖度的局部方差达到峰值, 这一趋势与图 5 处预估的最适宜尺度吻合, 说明在该研究区进行植被分析的前提下, 12 m 分辨率的像元大小近似等于该区域目标

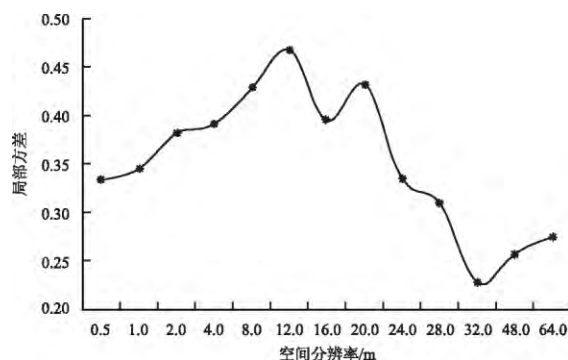


图 6 植被覆盖度不同空间分辨率的局部方差趋势图

Fig 6 Local Variance Trend Chart of Different Vegetation Coverage Spatial Resolution

地物的大小, 可以表达该区域的特征信息, 是该实验区的最适宜尺度。

4 结束语

本文通过计算研究区多种分辨率影像的 NDVI 和反演植被覆盖度, 并以此为基础, 运用局部方差思想和信息熵理论, 定量分析出该区域最佳空间尺度, 为植被研究中遥感影像最佳空间尺度的选择做出一定的尝试。

1) 高分辨率遥感影像图计算出的 NDVI 取值范围较宽, 随着栅格像元的增大, 值域范围呈现出收拢的趋势; 同时由于重采样的计算过程中, 对栅格中信息丢失的概率相同, 因此均值和标准差变化不太明显, 但是如果将不同传感器的不同分辨率数据进行计算的话, 均值与标准差的变化情况则有待确定。图斑数量属于分辨率的高敏感指标, 面积比则是低敏感指标。

2) 像元大小的改变, 往往影响着图像信息量的丰富程度, 这种现象在地表覆盖较为复杂的区域尤为明显。从信息熵的角度来度量栅格数据中所包含的信息, 可以发现, 随着栅格单元的变大, 其所包含的信息量也随之逐渐减少。

3) 通过描绘植被覆盖度信息熵的变化趋势线, 选取拐点发生前的平稳区间所对应的分辨率区间 (0.5~12 m) 为最佳分辨率区间; 然后对用于植被分析的两个波段和植被覆盖度的局部方差进行定量分析, 确定该研究区 Worldview-2 影像植被分析的最优空间尺度为 12 m。这种方法可以克服在植被研究过程中对高精度影像数据的盲目选择, 并且易于操作。但由于本研究主要以植被覆盖度为计算数据, 因此在信息熵的分析中以信息含量为主要考虑因素, 而在进行影像分类时, 空间尺度的选择则应更多的考虑信息熵所代表的不确定性

和可分性。

参考文献

- [1] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感: 原理、技术与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (TONG Qingxi, ZHANG Bing, ZHENG Lanfen. Hyperspectral remote sensing: theory, technology and applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.)
- [2] ATKINSON P M. Selecting the spatial resolution of airborne MSS imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(9): 1903-1917.
- [3] ATKINSON P M, CURRAN P J. Choosing an appropriate spatial resolution for remote sensing investigations[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1997, 63(12): 1345-1351.
- [4] ATKINSON P M, APLIN P. Spatial variation in land cover and choice of spatial resolution for remote sensing[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(18): 3687-3702.
- [5] ATKINSON P M, TATE N J. Spatial scale problems and geostatistical solutions: a review[J]. Professional Geographer, 2000, 52(4): 607-623.
- [6] WOODCOCK C E, STRAHLER A H, JUPP D L B. The use of variograms in remote sensing i: scene models and simulated images[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, (25): 323-348.
- [7] WOODCOCK C E, STRAHLER A H, JUPP D L B. The use of variograms in remote sensing i: real digital images[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, (25): 349-379.
- [8] 柏延臣, 王劲峰. 基于特征统计可分性的遥感数据专题分类尺度效应分析[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 443-449. (BO Yanchen, WANG Jinfeng. Exploring the scale effect in thematic classification of remotely sensed data: the statistical separability-based method [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(6): 443-449.)
- [9] 韩鹏, 龚健雅. 遥感尺度选择问题研究进展[J]. 遥感信息, 2008(1): 96-99. (HAN Peng, GONG Jianya. A review on choice of optimal scale in remote sensing[J]. Remote Sensing Information, 2008(1): 96-99.)
- [10] 韩鹏, 龚健雅, 李志林. 基于信息熵的遥感分类最优空间尺度选择方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(7): 676-679. (HAN Peng, GONG Jianya, LI Zhilin. A new approach for choice of optimal spatial scale in image classification based on entropy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(7): 676-679.)
- [11] 张婧, 刘咏梅, 徐健, 等. 影像分辨率对植被覆盖度提取的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 120-124. (ZHANG Jing, LIU Yongmei, XU Jian, et al. Scale effect analysis of the extraction about vegetation coverage [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(3): 120-124.)
- [12] 曾辉, 郭庆华, 刘晓东. 景观格局空间分辨率效应的实验研究: 以珠江三角洲东部地区为例[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1998, 34(6): 820-826. (ZENG Hui, GUO Qinghua, LIU Xiandong. Experimental research of spatial resolution effects for landscape pattern: a case study of the eastern part in zhujiang delta [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1998, 34(6): 820-826.)
- [13] WOODCOCK C E, STRAHLER A H. The factor of scale in remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1987, 21(3): 311-332.
- [14] 江淼, 张显峰, 孙权, 等. 不同分辨率影像反演植被覆盖度的参数确定与尺度效应分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(3): 311-315. (JIANG Miao, ZHANG Xianfeng, SUN Quan, et al. Vegetation coverage retrieval scale effect analysis using multi-sensor data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(3): 311-315.)
- [15] 韩鹏, 龚健雅, 李志林, 等. 遥感影像分类中的空间尺度选择方法研究[J]. 遥感学报, 2010, 14(3): 507-518. (HAN Peng, GONG Jianya, LI Zhilin, et al. Selection of optimal scale in remotely sensed image classification [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(3): 507-518.)
- [16] 汤国安, 张友顺, 刘咏梅. 遥感数字图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. (TANG Guoan, ZHANG Youshun, LIU Yongmei. Remote sensing digital image processing [M]. Beijing: Science Press, 2004.)
- [17] 马娜, 胡云峰, 庄大方. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化[J]. 地理科学, 2012, 32(2): 251-256. (MA Na, HU Yunfeng, ZHUANG Dafang. Vegetation coverage distribution and its changes in Plan Blue Banner based on remote sensing data and dimidiated pixel model [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(2): 251-256.)
- [18] 负培东, 曾永年, 历华. 不同遥感影像融合方法效果的定量评价研究[J]. 遥感信息, 2007(4): 40-45. (YUN Peidong, ZENG Yongnian, LI Hua. Quantitative assessment of image fusion methods [J]. Remote Sensing Information, 2007(4): 40-45.)
- [19] 周觅, 张杰林. 遥感影像尺度转换及最优尺度选择探讨[J]. 世界核地质科学, 2011, 28(2): 94-98. (ZHOU Mi, ZHANG Jielin. Review on scale transformation for remote sensing image and selection of optimal spatial resolution [J]. World Nuclear Geoscience, 2011, 28(2): 94-98.)
- [20] 明冬萍, 王群, 杨建宇. 遥感影像空间尺度特性与最佳空间分辨率选择[J]. 遥感学报, 2008, 12(4): 529-537. (MING Dongping, WANG Qun, YANG Jianyu. Spatial scale of remote sensing image and selection of optimal spatial resolution [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(4): 529-537.)

(责任编辑: 邓国臣)