

# 地质灾害危险性评价因子对格网大小的敏感性与误差分析

范林峰<sup>①②</sup> 胡瑞林<sup>①</sup> 周顺江<sup>③</sup> 王珊珊<sup>①②</sup> 张小艳<sup>①②</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院工程地质力学重点实验室 北京 100029)

(<sup>②</sup>中国科学院研究生院 北京 100049)

(<sup>③</sup>中国地质科学院水文地质环境地质研究所 石家庄 050061)

**摘要** 格网单元是利用地理信息系统(GIS)进行地质灾害的危险性评价时广泛采用的一种评价单元。对研究区进行格网划分之后,需计算每一格网单元的评价指标值,并进行叠加分析,进而划分危险性等级。但是,格网大小的确定目前仍依赖于专家经验,缺乏定量的计算模型。本文以湖北省恩施市为例,选取了地质灾害危险性评价中常用的评价因子和指标,分析了格网大小对各评价指标的影响机理,为格网大小的定量计算提供了科学依据。

**关键词** 地质灾害 评价因子 格网大小 敏感性分析

中图分类号:P694 文献标识码:A

## SENSITIVITY AND ERROR ANALYSIS OF CONTROLLING FACTORS DUE TO VARIATION OF GRID SIZES IN GEOHAZARD ASSESSMENT

FAN Linfeng<sup>①②</sup> HU Ruilin<sup>①</sup> ZHOU Shunjiang<sup>③</sup> WANG Shanshan<sup>①②</sup> ZHANG Xiaoyan<sup>①②</sup>

(<sup>①</sup>Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029)

(<sup>②</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(<sup>③</sup>Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061)

**Abstract** Image grid cell is a widely used mapping unit type in GIS-based geohazard assessment. Values of each controlling factor should be calculated and endowed to grids. Risk levels can be determined through overlay analysis. However, due to the lack of quantitative computational model, the determination of grid size is largely dependent on expert experience. Taking Enshi City as an example, this paper analyzes the influence mechanism of grid sizes on the most commonly used controlling factors. The results can provide scientific basis for the determination of grid size.

**Key words** Geohazard, Controlling factor, Grid size, Sensitivity analysis

\* 收稿日期: 2011-08-20; 收到修改稿日期: 2012-02-22.

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2008BAK50B04-3), 湖北省交通运输厅科技项目.

第一作者简介: 范林峰, 主要从事地质灾害的风险评价和地理信息系统方面的工作. Email: fanlinfeng1988@163.com

## 1 引言

作为国际上倡导和推广的防灾减灾途径之一, 地质灾害的危险性评价是地质灾害风险评价和管理的基础, 也是制定防灾减灾措施的重要依据。近年来, 随着地理信息系统(GIS)的迅速发展, 地质灾害危险性的研究取得了许多重要进展, 众多评价单元和模型被相继提出<sup>[1, 2]</sup>。其中, 格网单元由于采用矩阵的形式进行数据的组织和管理, 对应于GIS的栅格数据类型, 在实践中得到了广泛的应用。

但是, 利用格网单元进行危险性评价时, 如何确定格网单元的大小仍是一个尚未解决的问题, 针对这一问题的研究还十分有限<sup>[3, 4]</sup>。目前的研究与应用中, 格网大小的确定主要依赖于专家知识和经验, 缺乏定量的计算模型。要解决这个问题, 首先应当查清格网大小对评价因子和评价结果的具体影响形式和机理。本文以湖北省恩施市为例, 选取高程、坡度、坡向、断裂、水系、道路、工程地质岩组、地震烈度、降雨等常用的地质灾害评价因子, 分析了各评价因子对格网大小的敏感性及其评价过程中产生的误差, 拟为格网大小的确定提供一定的科学依据。

## 2 利用格网单元进行地质灾害危险性评价的关键过程

利用格网单元进行地质灾害危险性评价时, 首先需要确定危险性评价因子和指标, 然后将研究区按预定的大小划分为规则的格网作为基本的计算和绘图单元, 再将评价因子的值利用属性表存贮的方式赋予每一格网单元。最后, 对每一属性层的网格单元赋予相应的危险性权重, 进行叠加分析, 进而划分相应的危险性等级(图1)。

格网单元大小的确定是危险性评价的基础工作, 同一地区的某一因子指标可能由于格网大小的差异而被赋成不同的值, 从而对评价结果产生影响。本文以湖北省恩施市为例, 详细分析了格网大小对

各评价因子的具体影响过程。

## 3 研究区概况

恩施市位于湖北省西南部, 东经  $109^{\circ}4'48'' \sim 109^{\circ}58'42''$ 、北纬  $29^{\circ}50'33'' \sim 30^{\circ}39'30''$ 。东西宽 86.5km, 南北长 90.2km, 总面积  $3972\text{km}^2$ 。恩施市地处中国第二级阶梯的东部边缘, 属云贵高原的一部分, 地势西高东低, 山峰耸立, 平均海拔千米以上, 相对高差一般在 500~1300m 之间。清江自西向东穿越境内, 支流众多, 沟壑纵横, 地面切割较深。恩施市灰岩、石英砂岩、砂页岩分布广泛。根据研究区岩性的地层年代和工程地质性质, 将本地区的岩性分为以下 4 个类别: I 厚层块状白云岩, II 粉质砂岩、泥岩, III 石英砂岩、砂页岩, IV 中厚层状瘤状灰岩(图 2)。

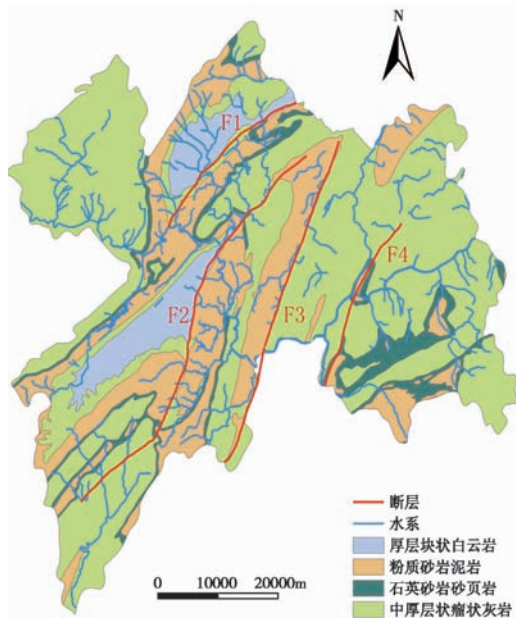


图 2 研究区概况

Fig. 2 General situation of study area

## 4 评价因子的敏感性与误差分析

本文根据评价因子的性质、评价方法和在 GIS

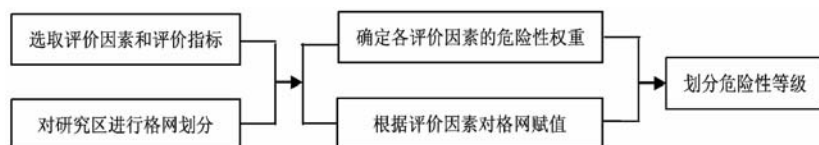


图 1 利用格网单元进行危险性评价的关键过程

Fig. 1 Key procedures of hazard assessment using grid cell

中的存储方式,将地质灾害评价中常用的危险性评价因子分为地形要素、矢量面状要素和矢量线状要素 3 大类,分别分析格网大小对这 3 类要素的影响机理。

#### 4.1 格网大小对地形要素的影响

高程、坡度、坡向是地质灾害危险性评价中最为常用的 3 种地形要素,可由 DEM 提取而来。GIS 中,对这 3 种地形要素的提取可采用不同的方法。提取方法不同,格网大小对其的影响机理也不相同。

##### 4.1.1 高程

确定格网单元高程的方法主要有两种。一是插值法,即对输入 DEM 进行插值运算获得格网单元的高程值,类似于栅格数据的重采样;二是统计法,即将格网单元的值赋成输入 DEM 的统计值(如平均值、最值、中值等)。

常用的插值方法有最邻近分配法、双线性插值法和三次卷积插值法。最邻近分配法将与格网单元最邻近的输入栅格单元的值分配给格网单元。双线性插值法和三次卷积插值法都是把原始栅格值的加权平均值赋给格网单元。这 3 种方法中,最邻近分配法最为简单,具有计算速度快的特点,并且能保留原栅格值。与最邻近分配法相比,双线性插值法可生成更平滑的表面。三次卷积插值法所得的运算结果精度较高,且能克服邻近插值的锯齿形状和二次线性的边缘模糊。但是,插值方法的计算精度仅仅是针对格网单元的中心点而言的。用中心点的高程表示整个格网单元的高程,当格网覆盖范围较广、地形起伏较大时,会产生较大误差。

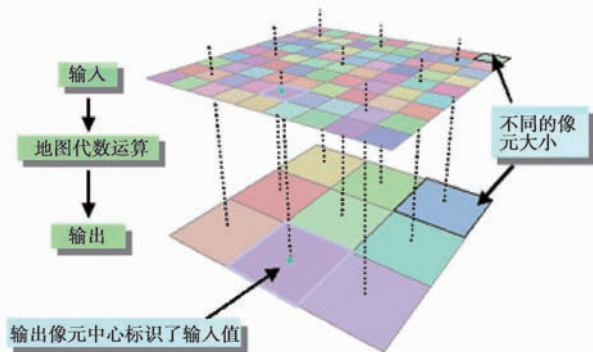


图3 格网高程的确定<sup>[3]</sup>

Fig. 3 Determination of grid altitude<sup>[3]</sup>

统计法将落入格网单元内的输入 DEM 栅格单元的统计值(如平均值、最值、中值等)赋予格网单元。当格网单元较大时,这种方法能更好地反映单

元内的地形特征。需要指出的是,有些统计值的计算实际上也可以看作是一种插值方法,如平均值,其插值系数为落入格网单元内的栅格单元数目的倒数。按照使用惯例,本文将将其划分到统计法中。

本文以平均值为例,分析了格网大小对高程取值的影响。将研究区分别以 100m, 200m, 300m, 400m, 500m 大小的格网进行划分,以 SRTM3 分辨率 90m 的 DEM 为原始数据,计算了各格网单元的高程值,并对计算结果进行了统计特征分析(表 1)。

表 1 高程与格网大小相关性的统计特征分析

Table 1 Statistical analysis of corelation between average altitude and grid size

格网大小/km	100	200	300	400	500
最大值/m	2107	2087	2064	2068	2048
最小值/m	236	246	247	274	270
平均值/m	1111.93	1111.97	1111.90	1112.21	1112.33
标准差	360.35	360.21	359.30	359.72	358.66

从表 1 中可以看出,高程最大值随格网大小的增大呈减少的趋势。当格网大小由 100m 增加到 500m 时,高程的最大值由 2107m 降低至 2048m。最小值则随格网大小的增大而增大,由 236m 增加至 270m。表明格网增大使地形出现明显的“削高补低”现象。标准差仅有微弱的降低,说明在本文的尺度范围内,格网大小对研究区内的高程波动影响不大。总的来说,格网大小的增大使得研究区的地形趋于平坦化。

##### 4.1.2 坡度与坡向

地表某点的坡度  $\beta$ 、坡向  $A$  可由下式表示:

$$\text{坡度 } \beta = \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (1)$$

$$\text{坡向 } A = \arctan (f_y / f_x) \quad (-\pi < A < \pi) \quad (2)$$

式中,  $f(x, y)$  是地形曲面,  $f_x$  是南北方向高程变化率,  $f_y$  是东西方向高程变化率。由 (1) (2) 两式知,求解地面某点的坡度和坡向,关键是求解  $f_x$  和  $f_y$ 。GIS 中,对  $f_x$  和  $f_y$  的求解一般通过  $3 \times 3$  移动窗口(图 4)利用数值差分方法计算获得。表 2 列出了 GIS 中常用的坡度坡向计算的数学模型。

利用 DEM 计算坡度和坡向时,误差主要来源于 DEM 对曲面的离散化误差和利用差分代替微分时的截断误差<sup>[8]</sup>。本文仅考虑 DEM 分辨率(即格网大小)对坡度计算产生的影响,利用原始 DEM 通过双线性插值法得到分辨率为 100m, 200m, 300m, 400m, 500m 的 DEM,利用三阶反距离平方权差分法得出坡度,并计算其统计特征(表 3)。

表 2 坡度坡向计算模型<sup>[8]</sup>Table 2 Algorithms of slope and aspect from DEM<sup>[8]</sup>

算法	$f_x$	$f_y$
二阶差分	$(Z_8 - Z_2)/2g$	$(Z_6 - Z_4)/2g$
三阶不带权差分	$(Z_7 - Z_1 + Z_8 - Z_2 + Z_9 - Z_3)/6g$	$(Z_3 - Z_1 + Z_6 - Z_4 + Z_9 - Z_7)/6g$
三阶反距离平方权差分	$(Z_7 - Z_1 + 2(Z_8 - Z_2) + Z_9 - Z_3)/8g$	$(Z_3 - Z_1 + 2(Z_6 - Z_4) + Z_9 - Z_7)/8g$
三阶反距离权差分	$(Z_7 - Z_1 + \sqrt{2}(Z_8 - Z_2) + Z_9 - Z_3)/(4 + 2\sqrt{2})g$	$(Z_3 - Z_1 + \sqrt{2}(Z_6 - Z_4) + Z_9 - Z_7)/(4 + 2\sqrt{2})g$
Frame 差分	$(Z_7 - Z_1 + Z_9 - Z_3)/4g$	$(Z_3 - Z_1 + Z_9 - Z_7)/4g$
简单差分	$(Z_5 - Z_2)/g$	$(Z_5 - Z_4)/g$

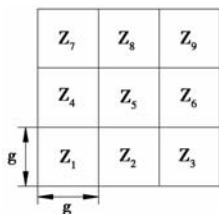


图 4 DEM 中 3×3 移动窗口

Fig. 4 3×3 local moving window in DEM

表 3 坡度与网格大小相关性的统计特征分析

Table 3 Statistical analysis of corelation between slope and grid size

网格大小/m	100	200	300	400	500
最大值/(°)	69.75	56.02	49.56	43.78	37.79
最小值/(°)	0.00	0.05	0.05	0.03	0.06
平均值/(°)	17.13	13.88	11.82	10.40	9.31
标准差	10.26	8.97	7.96	7.13	6.44

另外,将坡度划分为 $0^\circ \sim 10^\circ$ ,  $10^\circ \sim 20^\circ$ ,  $30^\circ \sim 30^\circ$ ,  $30^\circ \sim 40^\circ$ ,  $40^\circ \sim 50^\circ$ ,  $50^\circ \sim 60^\circ$ ,  $>60^\circ$ 共 7 个等级,统计不同网格大小情况下,各坡度等级的面积占研究区总面积的比例(图 5)。

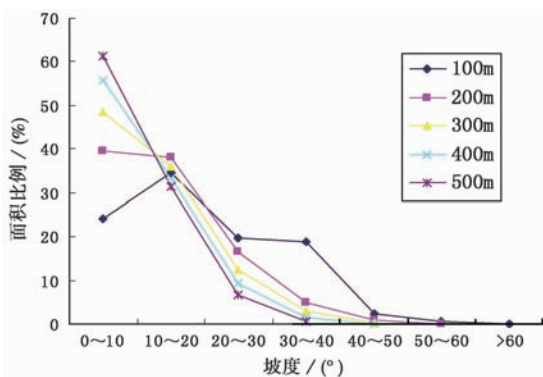


图 5 网格大小对坡度分布的影响

Fig. 5 The influence of the grid size on the distribution of slope

从表 3 中可以看出,网格大小由 100m 增加到 500m 时,坡度的最大值由  $69.75^\circ$  降低至  $37.79^\circ$ 。最小值略有波动,但总体呈上升趋势。标准差由 10.26 降低至 6.44,说明网格大小越大,研究区内的坡度波动变小。图 5 表明,网格大小的增大使得所提取的地形坡度逐渐减小,较陡坡度被概括,细微的地形变化被忽略。

同理,本文也统计了不同网格大小时各坡向的面积占研究区总面积的比例(图 6)。从图中可以看出,随着网格单元的增大,SE 和 NW 坡向的面积逐渐增大,而其他坡向都呈下降趋势。增加幅度最大的坡向是 SE,从 100m 网格时的 15.86% 增加到 500m 网格时的 18.18%;降低幅度最大的则是 SW,从 10.31% 降低至 8.61%。坡向的最大变化幅度为 2.32% (SE 坡向),远远低于坡度的变化,说明坡向对网格大小的敏感性要低于坡度。

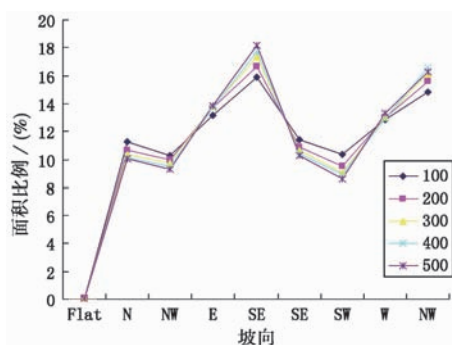


图 6 网格大小对坡向分布的影响

Fig. 6 The influence of the grid size on the distribution of aspect

#### 4.2 网格大小对矢量面状要素的影响

在危险性评价中,工程地质岩组和地震烈度可分别由地质图和地震烈度图获得,降雨条件由研究区的站点数据通过插值生成的降雨分布图表示,它们在 GIS 中通常以矢量面状要素格式存储。根据矢

量格式的面状要素为格网单元进行赋值时,由于数据结构不同,赋值过程中会产生属性误差和面积误差。

#### 4.2.1 属性误差

根据矢量数据为格网单元赋值,这一过程相当于GIS中矢量数据向栅格数据转化的过程。进行转换时,首先需要确定合适的编码规则,GIS中可以采用以下4种方法:

(1)中心点法——将栅格中心点处的属性作为整个栅格单元的属性。

(2)面积占优法——将栅格中所占面积最大的地物属性赋予栅格单元。

(3)长度占优法——根据每个栅格单元的中线(水平或垂直)的大部分长度所对应的地物类型的属性值来确定栅格单元的代码。

(4)重要性法——将栅格单元中最重要地物类型作为栅格单元的属性。

如图7a所示的一块矩形地表区域,内部含有A、B、C3种地物类型,O为中心点,并假设图中A类是最重要的地物类型,则根据上述4种编码规则,该矩形区域相应的栅格单元代码分别为C、B、B、A。

无论采用那种编码方法,由于每个栅格单元只有单一属性值,因此当一个格网单元内存在多种地

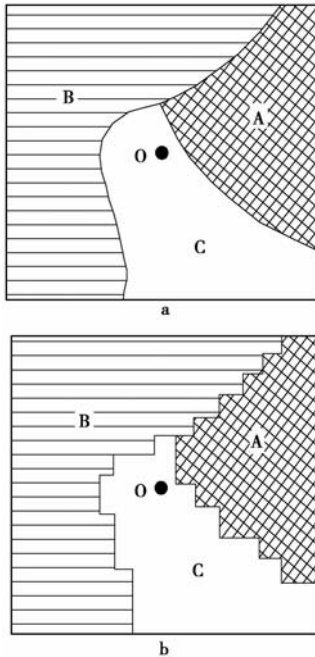


图7 格网属性的确定及网格化产生的面积误差(据文献[11]修改)

Fig. 7 Determination of grid attribute and the area error during gridding(revised from [11])

物的情况下,必将产生属性误差。有些学者<sup>[15]</sup>基于“结构化栅格”的概念,提出矢量数据属性信息无损栅格化的方法。但是,这种方法使得数据量大大增加,也增加了数据结构的复杂性,目前仍未见这种方法在地质灾害危险性评价中的应用。

#### 4.2.2 面积误差

除属性误差外,格网单元赋值过程中还可能存在面积误差。如图7b,格网划分后,原先光滑的地物边界变为锯齿状,从而导致面积误差的产生。本文以恩施市的岩性分布图为例,分析了格网大小对这种面积误差的影响。

设某类型面积误差公式为:

$$E = A_g - A_v \quad (3)$$

其中, $E$ 表示面积误差, $A_g$ 表示基于栅格求算的面积, $A_v$ 表示用矢量数据求出的面积。各岩性的面积误差与格网大小的关系见表4。

表4 岩性面积误差

Table 4 Area error of lithology type

格网大小/m	100	200	300	400	500	
岩性	I	-0.177	-0.757	-0.327	-0.277	-0.257
	II	-0.065	-0.015	-0.835	-2.615	-1.115
	III	-0.008	0.412	-0.398	-0.348	-1.628
	IV	0.300	0.500	0.820	1.300	2.900
合计	0.050	0.140	-0.740	-1.940	-0.100	

从表4中可以看出,在本文的研究尺度内,I、II类岩性的面积变化波动较大,但无明显的变化趋势。III类岩性随格网大小的增大,其面积逐渐减小,其面积的损失值由100m格网时的0.008km<sup>2</sup>增加至500m格网时的1.628km<sup>2</sup>。与此相反,格网大小的增大导致IV类岩性的面积逐渐增大,增加的面积从0.300km<sup>2</sup>逐渐增加至2.900km<sup>2</sup>。这种现象的产生与各岩性的分布有关。从图2中可以看出,III类岩性(图中的红色区域)分布范围最小,且为细条带状。这就决定了其在确定格网属性的过程中处于不利位置,因为当格网大小增大时,III类岩性覆盖格网单元的面积通常小于与其相邻的IV类岩性(图中的绿色区域),因而产生了III类岩性面积被IV类岩性“吞噬”的现象。

#### 4.3 格网大小对矢量线状要素的影响

地质灾害危险性评价中的许多评价因子如断裂、水系和道路等是以矢量线状要素的格式存储在GIS中的。对于这类评价因子,目前通常使用的方

法主要有两种,一是缓冲区分析,二是计算每个格网单元的线密度,以线密度作为评价指标。缓冲区分析中生成的缓冲区也具有光滑边界,同工程地质岩组和地震烈度一样,存在如何根据矢量数据为格网赋值的问题。因这一问题在前文中已作过叙述,本节主要讨论格网大小对线密度的影响。

采用线密度作为评价指标时,首先需要注意的是,不能将格网单元的大小设置得过小。因为格网尺寸设置过小,会导致危险性级别分布极不均匀。如图8所示的一块矩形区域,假设图中曲线为水系。灰色格网是被水系占据的区域,其水系线密度大于0,白色格网未被水系占据,其水系线密度为0。单因子分析中,根据线密度进行分级时,由于0是最低的水系线密度,因此白色格网被认为具有最低的危险性,而极高危险性、高危险性、中危险性的地区则分布在灰色区域内。对于恩施市,当以100m格网对其进行划分时,研究区内仅有4%左右的格网被水系占据(图9)。从而,研究区的极高危险性、高危险性、中危险性地区均分布在这约4%的地区内,这显然是不合理的。随着格网大小的增加,被水系占据的格网数目占总格网数目的比例呈增加趋势。因此,在用水系线密度作为水系对地质灾害影响作用的评价指标时,应适当增大格网单元的大小。基于

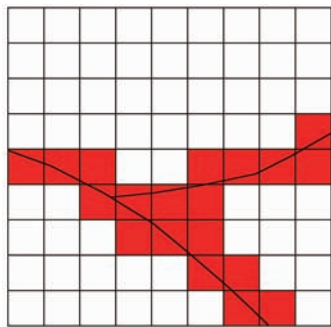


图8 非空格网示意图

Fig. 8 Illustration of occupied grids

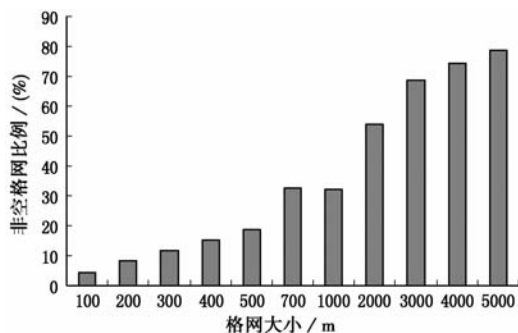


图9 不同格网大小对应的非空格网比例

Fig. 9 Proportion of occupied grids

以上考虑,本文在计算恩施市的水系线密度时,采用了较大的格网尺寸,分别为500m, 700m, 1000m, 2000m, 3000m, 4000m, 5000m。

#### 4.3.1 统计特征分析

在上述分析的基础上,本文计算了恩施市境内水系在不同格网大小下的线密度,分析了其统计特征(表5)。

表5 水系线密度与格网大小相关性的统计特征分析

Table 5 Statistical analysis of correlation between river density and grid size

格网大小/m	500	700	1000	2000	3000	4000	5000
最大值/ $m \cdot km^{-2}$	6732.04	5058.27	3841.38	2292.11	1463.46	1253.89	1033.60
最小值/ $m \cdot km^{-2}$	1.36	1.35	1.13	0.62	3.37	2.45	1.47
平均值/ $m \cdot km^{-2}$	1771.11	1288.83	938.03	535.68	402.67	355.00	322.63
标准差	1038.97	785.22	606.29	372.16	278.49	249.10	218.43

从表5中可以看出,水系线密度存在明显的尺寸效应。除最小值外,水系线密度的最大值、平均值和标准差均随着格网大小的增大明显降低。格网大小由500m增加至5000m时,水系线密度的最大值由 $6732.04 m \cdot km^{-2}$ 降低至 $1033.60 m \cdot km^{-2}$ ,且降低幅度逐渐增大。平均值亦有同样趋势。标准差由1038.97降低至218.43,说明格网大小越大,密度值波动越小。

将计算所得的密度每隔 $100 m \cdot km^{-2}$ 进行分级,即 $0 \sim 100 m \cdot km^{-2}$ 为第一类,在图9中的横坐标中表示为1,  $100 \sim 200 m \cdot km^{-2}$ 表示为2,  $200 \sim 300 m \cdot km^{-2}$ 表示为3,依此类推,直到 $3500 \sim 3600 m \cdot km^{-2}$ 。统计落入各级别内的格网数占总格网数的比例,见图10。

从图10中可以看出,当格网大小由500m增大至2000m时,曲线的峰值迅速向左移动,表明区内的优势密度范围迅速降低。但是,当格网大小增大到2000m后,曲线峰值随格网大小的变动幅度则较小。格网大小为3000m, 4000m, 5000m时,曲线峰值均落在 $400 \sim 600 m \cdot km^{-2}$ 之间,表明优势密度范围趋于稳定。因此可以认为2000m网格能较好地反映本地区水系分布的特征。

#### 4.3.2 分形特征分析

分形理论是现代数学的一个新的分支,分形理论和方法已成为分析尺寸效应的一个有力工具。本文采用计盒维数法计算恩施市境内水系的分形维

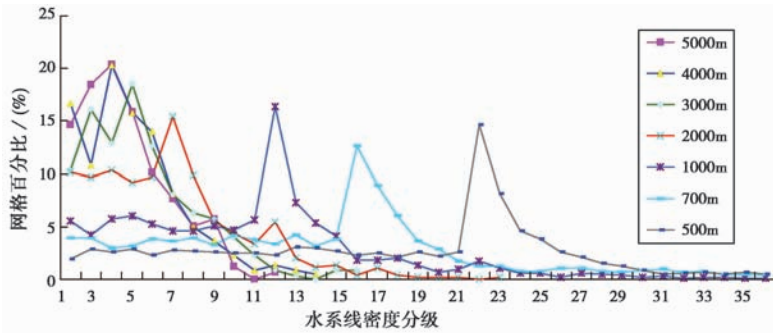


图 10 网格大小对水系密度分布的影响

Fig. 10 The influence of the size of grid on the distribution of river density

数。计盒维数法用宽度为  $r$  的正方形盒子覆盖,得到覆盖图形的非空盒子数  $N$ 。改变盒子的边长  $r$ ,得到一系列非空盒子数  $N$ ,绘制  $\ln N - \ln r$  曲线。如果  $\ln N - \ln r$  曲线存在线性特征,则表明水系分布具有分形特征。按照上述方法,对研究区水系的计盒维数进行了计算(表 6,图 11)。

表 6 水系计盒维数的计算

Table 6 Calculation of river box dimension

$r$	100	200	500	1000	2000	4000	6000	10000
$\ln r$	4.61	5.30	6.21	6.91	7.60	8.29	8.70	9.21
$N$	10635	5880	2393	1145	505	189	105	43
$\ln N$	9.27	8.68	7.78	7.04	6.22	5.24	4.65	3.76

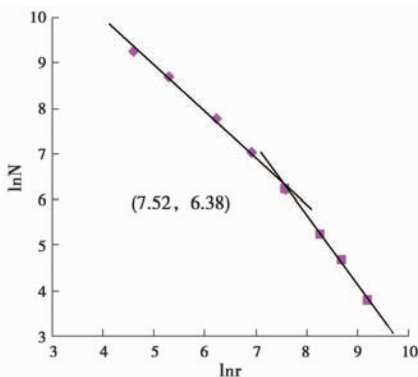


图 11 水系计盒维数的计算

Fig. 11 Calculation of river box dimension

从图中也可以看出,研究区内水系  $\ln N - \ln r$  曲线的分段线性特征比较明显,具有分形结构特征。分段线性的拐点位于(7.52, 6.38)处,对应的网格大小为 1850m,说明当网格大小达到 1850m 时水系的分形特征具有较高的稳定性和代表性,这与上文得出的 2000m 较为接近。

## 5 结论与讨论

本文研究了地质灾害的危险性评价中,格网单元大小对各评价指标取值的影响过程和机理。研究表明,对地形要素,格网大小的增大使得地形出现“削高补低”的现象,地形被平坦化。对工程地质岩组、地震烈度图和降雨分布图等矢量面状数据,格网大小的影响主要体现在格网单元赋值过程中的属性误差和面积误差。随着格网大小的增大,这种误差有增大的趋势。矢量线状要素的线密度指标对格网大小的敏感性则更为明显,格网大小的增大使得线密度迅速降低。

适宜格网单元大小的选取受多种因素的影响,如原始数据的精度、研究区的面积和工程地质条件以及项目要求的精度等。这些影响作用错综复杂,若单独分析各因素的作用,有时还会得出不同的结论。文献[4]指出,在进行规则格网单元的剖分时,应遵循以下原则:(1)格网应使单元精度能充分反映一定比例尺下地质实体的空间分布及其属性特征,满足该比例尺下地质体的实际精度;(2)网格化时应充分考虑计算机处理能力,在保证一定的网格化精度的情况下,尽可能地保证计算机运行的速度。笔者认为,在确定格网单元的大小时,除了要满足上述要求外,还应当考虑具体的评价方法及评价指标,根据格网大小对不同评价指标的作用方式和机理,选择适宜的格网大小。对于具体的研究区域,如何定量地确定适宜格网的大小仍需要进一步的研究。

## 参 考 文 献

- [1] 戴福初,李军.地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用[J].地质科技情报,2000,19(1):91~961.

- Dai Fuchu, Li Jun. Applications of geographical information systems in landslide studies. *Geological Science and Technology Information*, 2000, **19**(1): 91 ~ 961.
- [2] 兰恒星, 王苓涓, 周成虎. 地理信息系统支持下的滑坡灾害分析模型研究[J]. *工程地质学报*, 2002, **10**(4): 421 ~ 427.  
Lan Hengxing, Wang Lingjuan, Zhou Chenghu. Study on gis-aided model for analysis of landslide hazard. *Journal of Engineering Geology*, 2002, **10**(4): 421 ~ 427.
- [3] 李军, 周成虎. 基于栅格 GIS 滑坡风险评价方法中网格大小选取分析[J]. *遥感学报*, 2003, **7**(2): 86 ~ 92.  
Li Jun, Zhou Chenghu. Appropriate grid size for terrain based landslide risk assessment in Lantau island, Hong Kong. *Journal of Remote Sensing*, 2003, **7**(2): 86 ~ 92.
- [4] 张桂荣, 殷坤龙, 刘传正, 等. 基于 GIS 的陕西省旬阳地区滑坡灾害危险性区划[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, **14**(4): 39 ~ 43.  
Zhang Guirong, Yin Kunlong, Liu Chuangzheng, et al. The hazard zoning of landslide supported by GIS in Xunyang region of Shanxi province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, **14**(4): 39 ~ 43.
- [5] <http://help.arcgis.com/zh-cn/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/00590000001m000000/>.
- [6] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. *测绘学报*, 2004, **33**(3): 258 ~ 263.  
Liu Xuejun, Gong Jianya, Zhou Qiming, et al. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid digital elevation model (DEM). *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2004, **33**(3): 258 ~ 263.
- [7] 陈建军, 周成虎, 程维明. GIS 中面状要素矢量栅格化的面积误差分析[J]. *测绘学报*, 2007, **36**(3): 344 ~ 350.  
Chen Jianjun, Zhou Chenghu, Cheng Weiming. Area error analysis of vector to raster conversion of areal feature in GIS. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2007, **36**(3): 344 ~ 350.
- [8] 郭芳芳, 杨农, 孟晖, 等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J]. *中国地质*, 2008, **35**(1): 131 ~ 143.  
Guo Fangfang, Yang Nong, Meng Hui, et al. Application of the relief amplitude and slope analysis to regional landslide hazard assessments. *Geology in China*, 2008, **35**(1): 131 ~ 143.
- [9] 王峰, 王春梅. 地形因子与 DEM 分辨率关系的初步研究——以蒙阴县为例[J]. *水土保持研究*, 2009, **16**(4): 225 ~ 229.  
Wang Feng, Wang Chunmei. Research for the influences of dem resolution on topographical factors——A case study of Mengyin county. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, **16**(4): 225 ~ 229.
- [10] 陈楠, 王钦敏, 汤国安. 基于 DEM 的坡向提取算法对比分析——以黄土丘陵沟壑区的研究为例[J]. *遥感信息*, 2007.  
Chen Nan, Wang Qinmin, Tang Guo'an. Comparative analysis of the algorithms of aspect deriving from DEM——Take the study of loess hill and gully area as the case. *Remote Sensing Information*, 2007, **(1)**: 70 ~ 75.
- [11] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. DEM 结构特征对坡度坡向的影响分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2004, **20**(6): 1 ~ 5.  
Liu Xuejun, Gong Jianya, Zhou Qiming, et al. Research on error of derived slope and aspect related to DEM data properties. *Geography and Geoinformation Science*, 2004, **20**(6): 1 ~ 5.
- [12] 王晓理, 孙庆辉, 江成顺. 面积误差最小约束下矢量数据向栅格数据转换的优化算法[J]. *测绘学报*, 2006, **35**(3): 273 ~ 290.  
Wang Xiaoli, Sun Qinghui, Jiang Chengshun. An optimization algorithm for transferring vector to raster data based on minimized area error. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2006, **35**(3): 273 ~ 290.
- [13] 周成虎, 欧阳, 杨辽, 等. 矢量多边形栅格化的保积优化模型[J]. *中国科学(D 辑, 地球科学)*, 2006, **36**(增刊 II): 157 ~ 163.  
Zhou Chenghu, Ou Yang, Yang Liao, et al. Area-remained optimal model for rasterization of vector polygon. *Science in China(Ser. D Earth Sciences)*, 2006, **36**(s II): 157 ~ 163.
- [14] 杨存建, 张增祥. 矢量数据在多尺度栅格化中的精度损失模型探讨[J]. *地理研究*, 2001, **20**(4): 416 ~ 422.  
Yang Cunjian, Zhang Zengxiang. Models of accuracy loss during rasterizing landuse vector data with multiscale grid size. *Geographical Research*, 2001, **20**(4): 416 ~ 422.
- [15] 白燕, 廖顺宝. 矢量数据属性信息无损栅格化的实现方法——以全国 1:25 万土地覆被数据为例[J]. *地球信息科学学报*, 2010, **12**(3): 385 ~ 391.  
Ba Yan, Liao Shunbao. Implement method of vector data rasterization that without attribute information loss: A case study of 1:250000 land cover data of China. *Journal of Geo-information Science*, 2010, **12**(3): 385 ~ 391.
- [16] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 赵洲, 肖建章. 基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. *工程地质学报*, 2010, **18**(1): 15 ~ 26.  
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin, Zhao Zhou, Xiao Jianzhang. GIS platform and certainty factor analysis method based on Wenchuan earthquake induced landslide susceptibility evaluation. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(1): 15 ~ 26.
- [17] 马宗伟, 许有鹏, 李嘉峻. 河流形态的分维及与洪水关系的探讨——以长江中下游为例[J]. *水科学进展*, 2005, **16**(4): 530 ~ 534.  
Ma Zongwei, Xu Youpeng, Li Jiajun. River fractal dimension and the relationship between river fractal dimension and river flood: Case study in the middle and lower course of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(4): 530 ~ 534.
- [18] 孙祝友, 杜国云, 李德一, 等. 基于 GIS 技术的莱州湾东岸河流分形研究[J]. *测绘科学*, 2007, **32**(3): 120 ~ 121.  
Sun Zhuyou, Du Guoyun, Li Deyi, et al. The fractal research of river channels in the eastern coast of Laizhou bay based on GIS. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, **32**(3): 120 ~ 121.