

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.02.17

沟谷空间特征与斜坡灾害发育关联性分析

王鲁男, 晏鄂川, 李兴明, 陆文博
(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 沟谷作为一种侵蚀地貌, 其空间特征对斜坡灾害发育有重要影响。以重庆市梁平县 DEM 数据为基础, 应用 ArcGIS 软件的水文分析模块提取沟谷网络, 以流域为划分标准得到 7 个研究区, 分别采用分形理论和沟谷密度定量地研究沟谷空间特征。结合研究区内已发生 289 处斜坡灾害, 从表征意义和相关系数两方面分析分维值和密度值与斜坡灾害发育的关联性, 进而探讨沟谷两种特征值在斜坡灾害空间预测中的应用。研究表明, 阈值为 10 时, 提取沟谷网络与实际沟谷分布最为相符; 研究区的沟谷形态分维值和密度均较小, 并具有南北区域小、东西区域大的特点, 符合实际调查中发现东西区域地表破碎程度强于南北区域的情况; 在区域地貌处于幼年时期时, 相对于密度, 分维值更能体现沟谷空间特征对斜坡灾害发育的影响, 在斜坡灾害空间预测中有更高的实用价值。

关键词: 斜坡灾害; 沟谷空间特征; 分形理论; 沟谷密度

中图分类号: P642.21; P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)02-0097-06

Correlation analysis on spatial characteristics of gully and slope disasters

WANG Lunan, YAN Echuan, LI Xingming, LU Wenbo
(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Spatial characteristic of gully which is an erosion landform is the key to slope disasters. The DEM data of Liangping county in Chongqing is used to extract the gully network by the hydrologic analysis method. Spatial characteristic of gully of seven areas in watershed division are studied by the fractal theory and density quantitatively. Combined with the data of 289 slope disasters in Liangping, association of spatial characteristics of gully and slope disasters is analyzed by symbolical meanings and correlation coefficient. Then characteristic values of gully are used in slope disasters prediction. It was found that gully network agrees with the actual gully when the threshold value is 10. The fractal dimension value and density of gully are relatively small. Characteristic value of east and west region is greater than the other regional characteristic value according to the actual. Compared to density, the fractal dimension value of gully in juvenile period can reflect the relationship between spatial characteristic of gully and slope disasters, having higher practical value in the prediction of slope disasters.

Keywords: slope disasters; spatial characteristics of gully; fractal; gully density

0 引言

沟谷也称沟壑, 指河流切割与地表侵蚀过程所形成的河蚀小地貌系统。地貌上处于坡地与河道之间, 是连接两者的纽带。沟谷作为流域的中枢, 是流域侵

蚀物质的发源地、停积场地, 流域地貌系统中最为活跃的部分^[1]。它不仅把坡地地表水和表面物质输送到河道中, 自身还产生大量的泥沙和水流, 促使沟谷不断向前发展、蚕食坡地。沟谷的持续侵蚀, 不但造成岩土破碎, 稳定性差, 且是山区形成高陡临空面的重要促进

收稿日期: 2014-08-06; 修订日期: 2014-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB710605)

第一作者: 王鲁男(1988-), 男, 在读博士, 研究方向为地质灾害预测预报。E-mail: 1010023462@qq.com

通讯作者: 晏鄂川(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土体稳定性评价和保护设计研究。E-mail: yecyec6970@163.com

因素,使斜坡灾害发育的可能性大增^[2]。因此沟谷空间特征对斜坡灾害发育研究有重要的意义。

国内外学者对沟谷地貌作了广泛的研究。景可^[3]在分析沟谷发育程度和分布特征基础上,探讨了沟谷密度和侵蚀量的关系;Tucker、Catani^[4]分析了沟谷密度在流域尺度下存在的空间分异特征,揭示了沟谷发育过程;于秀治、韦京莲^[5]利用多因素关联度分析找出沟谷切割深度、沟床纵坡等因素与泥石流的密切关系程度,将泥石流的影响因素与泥石流规模、发展态势的紧密程度做定量分析;连建发、刘传正、高尚嵘^[6]应用分形理论对巴东斜坡区的沟谷水系特征进行研究,分析水系的发育程度及其所处的地貌侵蚀发育阶段;李建林、张洪云、李振林^[7]利用分形理论分析了矿山泥石流沟谷形态特征,并与自然泥石流沟谷形态进行比较研究;周志华、林维芳、徐标^[8]以 ArcGIS 为平台,利用信息量模型,重点分析了研究区沟谷密度对滑坡发育的影响,定量地给出了二者的相关关系;杨岩岩、刘连友^[9]利用 SRTM DEM 和 TM 数据及 ArcGIS 软件,计算了无定河流域沟谷密度,并分析了其影响因素;郭碧云、傅旭东、张正峰^[10]以 GIS 为平台,对地震重灾区龙溪河流域次生地质灾害与沟谷水系分形维数关系进行了研究。

以往研究主要集中于沟谷空间特征和发育阶段,进而确定流域的地貌侵蚀发育阶段和水土流失程度。少部分涉及到沟谷地貌与斜坡灾害间的联系,却对沟谷空间特征的定量描述缺乏认识,尤其是沟谷空间特征值的意义研究不足,因此也就无法将其与斜坡灾害空间预测联系起来。鉴于此,本文以梁平县的 DEM 数据为基础,应用 ArcGIS 软件的水文分析模块提取沟谷网络,运用分形理论和沟谷密度定量地研究沟谷空间特征;结合已发生的斜坡灾害,利用相关系数反映沟谷空间特征值(分维值和密度值)与斜坡灾害发育的关联性,进而探讨沟谷两种特征值在斜坡灾害空间预测中的应用。

1 沟谷空间特征信息研究

1.1 沟谷网络的提取

早期沟谷网络提取需要在地形图基础上进行野外实地考察,不但工作量大,且人为因素影响明显,精度也较低。随着计算机技术的发展,尤其是地理信息系统的引入,基于 DEM(数字高程模型)数据的沟谷网络提取方法为研究人员提供了一种新思路。本文在已有 DEM 数据基础上,采用 ArcGIS 的水文分析模块提取沟谷网络,具体步骤见图 1。

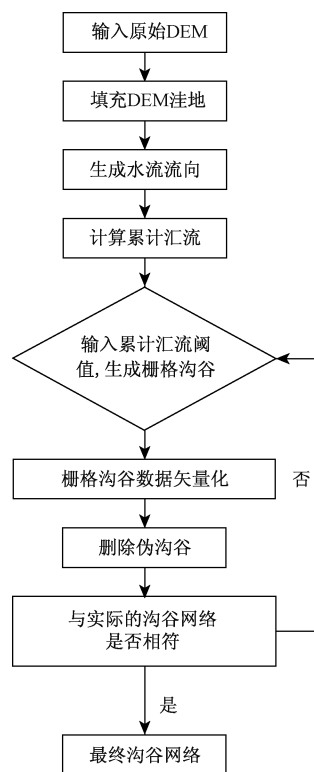


图 1 沟谷网络提取步骤

Fig. 1 Extraction of gully network

1.2 沟谷空间特征信息研究

1.2.1 沟谷形态分形研究

对于自然界中具有尺度不变性和自相似性特点的不规则现象,如海岸线、水系等,可以采用分形理论研究。沟谷可看作一系列不规则的线状集合体,满足自相似性或者标度不变性,即在所有尺度上,部分与整体是相似的。满足以上要求,沟谷的展布形态可以采用分形来研究。

分形的特点是由分维值来定量描述的。分维值的求法有很多,而变换粗视化程度求维数的盒维数法最适合于由多条多段沟谷组成的复杂沟谷的统计。根据分形原理,沟谷的展布满足。

$$N_r \propto r^{-D} \quad (1)$$

$$\lg N_r = A - D \lg r \quad (2)$$

其中: N_r ——边长为 r 的网格覆盖沟谷的格子总数;

D ——沟谷的盒维数,即分维值^[11]。

基于 ArcGIS 软件的网格分析模块,通过不断变换正方形网格边长 r 并自动统计包含沟谷的格子总数得到一组数据,拟合趋势线,斜率即为分维值。

1.2.2 沟谷密度分析

沟谷密度也称为沟壑密度或沟道密度,指单位面积内沟谷的总长度,以 km/km^2 为单位,数学表达式:

$$D_s = \frac{\sum L}{A}$$

(3)

其中： D_s ——沟谷密度；
 $\sum L$ ——样区内的沟谷总长度；
 A ——特定样区的面积。
它是描述地面被沟谷切割破碎程度的重要指标，是地质构造、降雨、植被和地面组合物质等因素综合影响的反映^[12]。

基于 ArcGIS 软件的沟谷密度算法可采用区域分析模块求得样区的面积，样区内的沟谷总长度由自身的属性表添加长度选项可得。

2 实例分析

重庆市梁平县地貌上集中表现为“三山五岭，两槽一坝，丘陵起伏，六水外流”，特殊的地貌，尤其是发达的沟谷网络为斜坡灾害的发育提供了地形条件和动力条件。基于已有 DEM 数据，遵循图 1 提取沟谷网络。通过循环试算，得到累计汇流阈值为 10 时，沟谷网络与实际最为相符（图 2）。限于 DEM 本身精度的影响，部分沟谷位置发生改变，与实际分布存在一定的差异。但总体而言，在一定的尺度条件下，利用 DEM 来提取沟谷是完全可行的。

分区研究沟谷空间特征，为保证沟谷完整性，按流域划分，共分为 7 个研究区（回龙、龙溪、黑滩、波漩、汝溪、普里、明月）。对比研究 7 个区的地质勘察资料发现，各区出露地层相似，大部分为侏罗系（J）及三叠系（T）沉积岩，地质构造影响较小，除地形地貌外，其他斜坡灾害发育的影响因素基本相同。因此，本文认为不同研究区的斜坡灾害发育主要受控于地形地貌，尤其是沟谷的空间分布特征。

2.1 沟谷空间特征研究

基于盒维数法，通过 ArcGIS 软件不断调节网格边长 r 并统计覆盖沟谷的格子总数，通过趋势线得到分维值和复相关系数，鉴于篇幅原因，仅给出回龙研究区的具体结果（表 1、图 3）。

同理，可得到其余 6 个研究区沟谷形态分维值和复相关系数（表 2）。

7 个研究区的复相关系数大于 0.99，说明 $\lg r$ 和 $\lg (N_r)$ 具有十分显著的线性相关性。分维值处于 1.081 ~ 1.147，宏观上具有南北区域小、东西区域大的特点。总体来看，分维值变化较小，说明研究区内 7 研究区沟谷基本处于同一发育阶段。

利用 ArcGIS 软件区域分析模块统计各研究区面

积，计算得到各研究区沟谷密度（表 3）。

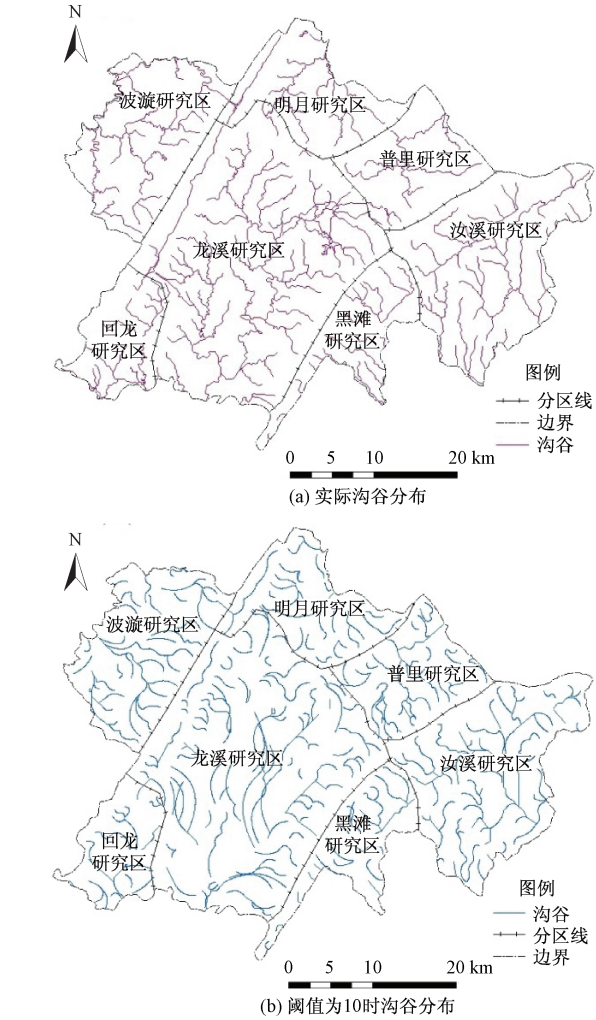


图 2 提取沟谷与实际沟谷分布对比
Fig.2 Comparison of extracting and actual gully

表 1 盒子边长及沟谷所覆盖的盒子数
Table 1 Side of box and the number of boxes on the gully network

网格边长 (r)	沟谷覆盖格子数 (N_r)	$\lg r$	$\lg (N_r)$
10	7871	1.000	3.896
30	2618	1.477	3.418
50	1571	1.699	3.196
80	978	1.903	2.990
100	782	2.000	2.893
150	515	2.176	2.712
200	389	2.301	2.590
500	153	2.699	2.185
1000	76	3.000	1.881
2000	32	3.301	1.505
5000	9	3.699	0.954
8000	5	3.903	0.699

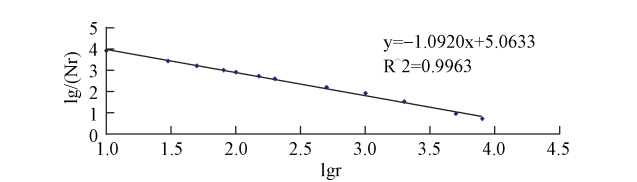


图3 回龙研究区 lgr 与 lg(Nr) 关系趋势线
Fig.3 Tendency line of lgr and lg(Nr) in Huilong the study area

表2 研究区沟谷形态分维值及复相关系数

Table 2 Fractal dimension value of gully form and multiple correlation coefficient

研究区	明月	普里	汝溪	波漩	黑滩	龙溪
分维值	1.086	1.145	1.140	1.134	1.081	1.147
复相关系数	0.996	0.994	0.993	0.995	0.997	0.993

表3 研究区沟谷密度值

Table 3 The density values of gully

研究区	回龙	明月	普里	汝溪	波漩	黑滩	龙溪
沟谷密度 (km/km ²)	0.505	0.536	0.652	0.560	0.580	0.552	0.537

7 个研究区沟谷密度处于 0.505 ~ 0.652 km/km², 同样具有南北小、东西大的特点,符合实际调查中东西区域地表破碎程度强于南北区域的情况。普里研究区沟谷密度最大,说明该研究区地表较其他研究区更破碎,回龙研究区沟谷密度最小,剩余 5 研究区沟谷密度差距不明显。

2.2 关联性分析

结合研究区内已发现的 289 处斜坡灾害(表 4),研究沟谷空间特征值(分维值和密度)与斜坡灾害个数和规模的关联性,结果如图 4、图 5,其中左纵坐标同时表征斜坡灾害数量、面积、体积。

表4 研究区斜坡灾害统计表

Table 4 Statistical table of slope disasters in the study areas

研究区	数量/个	面积/ × 10 ⁴ m ²	体积/ × 10 ⁴ m ³
回龙	18	37.1262	217.300
明月	36	59.082	232.792
普里	46	81.401	361.527
汝溪	42	108.512	480.189
波漩	47	124.461	268.577
黑滩	22	51.605	169.180
龙溪	78	86.594	333.304

从图 4、图 5 可以发现,分维值和密度与斜坡灾害发育皆有一定的关联性,尤其是与斜坡灾害发育规模有更高的契合性。之所以存在这种关联性,主要是因为分维值和密度从不同角度、不同程度上表征了沟谷空间分布特征。

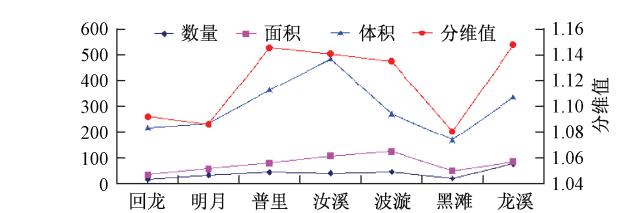


图4 沟谷形态分维值与斜坡灾害发育关系图
Fig.4 Relationship between fractal dimension value of gully form and slope disasters

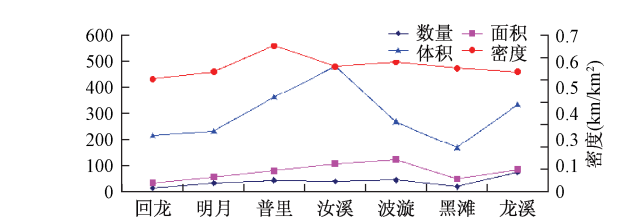


图5 沟谷密度与斜坡灾害发育的关系图
Fig.5 Relationship between density values of gully and slope disasters

沟谷形态分维值是沟谷形态结构复杂程度的量化表达,不但反映研究区域地表的破碎程度,而且隐含了区域地貌发育形态。具体来说,分维值越大,地表受流水侵蚀、切割的强度越大,地表越破碎,区域地貌处于发育的较晚期;分维值越小,地表受流水侵蚀、切割的强度越小,地表相对平缓,区域地貌处于发育的较早期。沟谷密度表征的含义与沟谷分维值有所不同,它是对地表复杂程度的描述,是一种宏观意义的表达,不能反映沟谷结构细节以及沟谷发育状况。一般来说,沟谷密度越大,地面越破碎,地表径流作用下地表物质稳定性就越差,易引起斜坡灾害的发生。从实例结果可知,两者皆能有效地反映沟谷空间特征与斜坡灾害发育的关联。

2.3 对比分析

为进一步定量地反映关联性,求出并对比各曲线间的相关系数(图 6)。

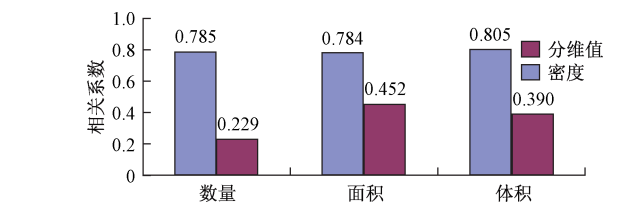


图6 相关系数对比图
Fig.6 Contrast diagram of correlation coefficient

从图 6 可以看出,沟谷形态分维值与斜坡灾害个数和规模有更好的正相关性,达到了高相关性,而沟谷

密度与斜坡灾害个数和规模处于中等相关性以下。比较而言,沟谷形态分维值在斜坡灾害空间预测中有更好的应用。

但是,沟谷形态分维值应用范围具有一定的局限性。沟谷形态分维值差异反映出区域地貌侵蚀程度的强弱。当分维值较小时,区域地貌处于侵蚀发育的幼年期。此时,沟谷尚未完全发育,区内深切侵蚀剧烈,沟谷多呈“V”形。分维值越接近2,区域地貌越趋于老年期^[13]。此时,沟谷失去侵蚀能力,逐渐形成谷底平原。因此,沟谷形态分维值与斜坡灾害发育关联性是随着区域地貌发育程度而变化的,这种正相关性仅在沟谷侵蚀性强时才有实际意义,可以预见的是一旦超过某个界限值,分维值与斜坡灾害发育可能出现负相关。而沟谷密度则不存在这种问题。

综上所述,沟谷形态分维值和沟谷密度都是表征地貌复杂程度的定量指标,只是在具体描述地貌形态时候侧重点有所不同。从实例结果可以看出,暗含区域地貌发育形态的沟谷形态分维值与斜坡灾害发育有更好的关联性,在斜坡灾害预测中能更好地反映沟谷空间特征对斜坡灾害发育的影响。但是沟谷形态分维值与斜坡灾害关联性受区域地貌发育程度影响,应用范围相对有限。沟谷密度值则较为稳定地反映出沟谷空间特征与斜坡灾害发育的联系。

3 结论

本文以DEM为基础提取沟谷网络,利用分维值和密度分析沟谷的空间特征,并结合已发生的斜坡灾害,探讨沟谷两种分布特征值在斜坡灾害空间预测中的应用,主要结论如下:

(1)基于DEM提取沟谷网络,累计汇流阈值对精确度有重大影响。通过试算,当阈值为10时,提取的沟谷网络与梁平县实际沟谷分布最为接近。

(2)梁平县境内7研究区沟谷形态分维值处于1.081~1.147,宏观上具有南北区域小、东西区域大的特点;沟谷密度处于0.505~0.652 km/km²,同样具有南北区域小、东西区域大的特点,与实际调查中发现东西区域地表破碎程度强于南北区域的情况相符。

(3)从相关系数来看,沟谷形态分维值与已发生斜坡灾害数量和规模有更好的正相关性,相关度达0.8;沟谷密度与已发生斜坡灾害数量和规模相关性较差,最大仅0.452。

(4)区域地貌处于幼年期,沟谷形态分维值更能定量地反映沟谷空间特征在斜坡灾害预测中的作用;区域地貌处于老年期,沟谷形态分维值与斜坡灾害相关性失去意义。而沟谷密度与斜坡灾害相关性具有一致的工程意义。

参考文献:

- [1] J A Martinez-Casasnovas. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion[J]. Catena, 50: 293 - 308.
- [2] P J J. Desmet, J Poesen, G Govers, et al. Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies[J]. Catena, 37: 377 - 392.
- [3] 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究[J]. 地理科学, 1986, 6(4): 340 - 347.
JING Ke. A study on gully erosion on the loess plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 1986, 6(4): 340 - 347.
- [4] Tucker G E, F Catani. Statistical analysis of drainage density from digital terrain data[J]. Geomorphology, 2001, 36(3-4): 187 - 202.
- [5] 于秀治, 韦京莲. 灰色系统理论在北京山区泥石流危险度评价预测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 118 - 120.
YU Xiuzhi, WEI Jinglian. Grey system analysis and its application in the forecast of mud-rock flow criticality of Beijing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 118 - 120.
- [6] 连建发, 刘传正, 高尚嵘. 三峡库区巴东斜坡区沟谷水系的分形几何特征研究[J]. 勘察科学技术, 2007, 186(6): 25 - 28.
LIAN Jianfa, LIU Chuazheng, GAO Shangrong. Research of fractal geometry characteristic on water system in gullies and valleies of Badong slope area in Three Gorges reservoir area [J]. Site Investigation Science and Technology, 2007, 186(6): 25 - 28.
- [7] 李建林, 张洪云, 李振林. 矿山泥石流沟谷形态的分形分维[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(1): 1 - 5.
LI Jianlin, ZHANG Hongyun, LI Zhenlin. Fractal analysis on morphology of mine debris flow gully[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(1): 1 - 5.

- [8] 周志华,林维芳,徐标. 基于 GIS 与信息量模型的沟谷密度与滑坡发育关系的研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(1): 119-121.
ZHOU Zhihua, LIN Weifang, XU Biao. Relationship between gully density and landslide based on GIS and information value model[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(1): 119-121.
- [9] 杨岩岩,刘连友. 无定河流域沟谷密度特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 3: 79-85.
YANG Yanyan, LIU Lianyou. Characteristics of gully density in the Wuding river basin and its influencing factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 3: 79-85.
- [10] 郭碧云,傅旭东,张正峰. 震后龙溪河流域河床纵剖面变化和沟谷分形[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 118-128.
GUO Biyun, FU Xudong, ZHANG Zhengfeng. The longitudinal change and gully bed fractality of Longxi river valley after the earthquake[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(1): 118-128.
- [11] 盘晓东,康力. 浑江断裂带及水系的分形特征和构造活动性研究[J]. 东北地震研究, 2002, 18(4): 7-15.
PAN Xiaodong, KANG Li. Study on fractal characteristics of Hunjiang fault zone and drainage systems and activity of tectonic [J]. Seismological Research of Northeast China, 2002, 18(4): 7-15.
- [12] 田剑,汤国安,周毅,等. 黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 622-628.
TIAN Jian, TANG Guoan, ZHOU Yi, et al. Spatial variation of gully density in the loess plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 622-628.
- [13] 何隆华,赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 124-128.
HE Longhua, ZHAO Hong. The fractal dimension of river networks and its interpretation [J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(2): 124-128.

(上接第 86 页)

- [7] 王哲,易发成. 基于层次分析法的绵阳市地质灾害易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 93-98.
WANG Zhe, YI Facheng. Evaluation of geological hazard probability of occurrence based on analytical hierarchy process in Mianyang city[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(3): 93-98.
- [8] 蔡鹤生,周爱国,唐朝晖. 地质环境质量评价中的专家一层次分析定权法[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 1998, 23(3): 299-302.
CAI Hesheng, ZHOU Aiguo, TANG Zhaohui. Expert-analytic hierarchy weighting process in geological environmental quality assessment [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(3): 299-302.
- [9] 褚洪斌,母海东,王金哲. 层次分析法在太行山区地质灾害危险性分区中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 125-129.
CHU Hongbin, MU Haidong, WANG Jinzhe. Application of analytic hierarchy process on zoning hazard degree of geologic disaster in Taihang Mountain region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(3): 125-129.
- [10] 汪名鹏. 苏锡常地区主要地质灾害及防治措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(1): 60-65.
WANG Mingpeng. Main geological disasters and prevention measure in Su Xi Chang region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(1): 60-65.
- [11] 黄敬军,缪世贤,张丽. 江苏省地质环境综合区划研究[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1982-1992.
HUANG Jingjun, MIAO Shixian, ZHANG Li. The comprehensive division of geo-environment in Jiangsu province [J]. Geology in China, 2013, 40(6): 1982-1992.