

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.01.18

# 基于 GIS 和层次分析法的冲积扇 油气管道段坡面侵蚀性评价

吕擎峰<sup>1</sup>, 王庆栋<sup>1</sup>, 王生新<sup>2</sup>, 赵本海<sup>1</sup>

(1. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;  
2. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 坡面侵蚀是管道穿越冲积扇地质灾害的重要类型之一。通过对青海省乌兰县希里沟北山山前冲积扇油气管道建立坡面侵蚀单体模型, 以遥感影像解译为基础, 结合野外调查, 沿管线得到 40 个灾害点。获取坡度、来水量、地表抗冲性、渗透性、植被等 7 个指标因子, 用层次分析法确定各因子权重, 发现坡度所占权重最高, 达 35.1%。借助 ArcGIS 软件, 建立数据库, 方便属性查询。通过加权叠加, 将最终栅格图层按自然断点法进行分级, 分为五级, 得到调查点侵蚀强度等级图。比较分析结果与实际管线调查情况较吻合, 表明该方法在坡面侵蚀研究中值得推广, 从而为油气管道运营期主要治理区域及新管线的选线提供一定的理论支持。

**关键词:** GIS; 坡面侵蚀; 冲积扇; 指标因子; 加权叠加

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)01-0119-06

## GIS and AHP based slope erosion analysis for the oil and gas pipeline across alluvial fan

LYU Qingfeng<sup>1</sup>, WANG Qingdong<sup>1</sup>, WANG Shengxin<sup>2</sup>, ZHAO Benhai<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Geological Hazards Research and Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** Erosion caused by sloping surface is one of the important types in pipeline disasters passing alluvial fan. Based on the interpretation of remote sensing images and the field investigation, established slope model of erosion monomer and obtained 40 points along pipeline of alluvial fan which lies in the north of Xili channel in Wulan county of Qinghai Province. Extracted seven factors such as slope, water yield, anti-scourability, permeability, vegetation coverage and so on, using AHP to determine the weight of each factor, find slope has the highest weight of all, up to 35.1%. Establish a database of alluvial fan in order to query attribute by GIS. The final grid layer is divided into five levels, and the erosion intensity grade map is obtained by weighted stack. Comparing analysis results and actual pipeline investigation, find which have a good consistency. The results show it is worth popularizing in the study of slope erosion. So as to provide some theoretical support for the main government area of existing pipeline and line selection of new pipeline.

**Keywords:** GIS; slope erosion; alluvial fan; index factors; weighted-overlay

收稿日期: 2017-03-25; 修订日期: 2017-04-13

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司西部管道分公司科技开发项目(XG-2015-001)

第一作者: 吕擎峰(1971-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 副教授, 从事岩土工程与地质灾害方面的研究。E-mail: lvqf@lzu.edu.cn

### 0 引言

土壤侵蚀对人类的生存和发展危害较大,因此受到人们的普遍重视<sup>[1]</sup>。早期主要通过模拟试验,19 世纪 70 年代,德国土壤学家 Wollny 建立了世界上第一批径流小区,研究各因子与土壤侵蚀的关系。20 世纪 40 年代,Ellison 将侵蚀过程分雨滴侵蚀、径流侵蚀、雨滴搬运、径流搬运过程,这一研究标志土壤侵蚀研究由定性阶段进入定理研究阶段。60 年代以后,随着计算机的发展,建立了侵蚀预报模型。80 年代,侵蚀产沙及其机理研究取得重要进展<sup>[2]</sup>。80 年代以后,随着测试技术的改进和相关学科的发展,对侵蚀影响因子进行了更深入的研究<sup>[3-4]</sup>。随着 GIS 技术的成熟,将 GIS 引入冲积扇坡面土壤侵蚀成为人们关注的热点。

我国长输油气管道是国家经济的大动脉,但由于埋深浅、跨区广等特点,其抵御地质灾害的能力较差,因而出现较多的管道地质灾害现象,严重影响长输油气管道的安全运营。西部长输油气管道常常穿越山前大型冲积扇,坡面侵蚀十分发育<sup>[5]</sup>, 占所有地质灾害的 40.9%。

由于冲积扇坡面流呈网状,且相互影响,冲积扇坡面侵蚀过程极为复杂,影响因子众多。针对油气管道坡面侵蚀单体的风险性评价,本文提出模型见图 1。

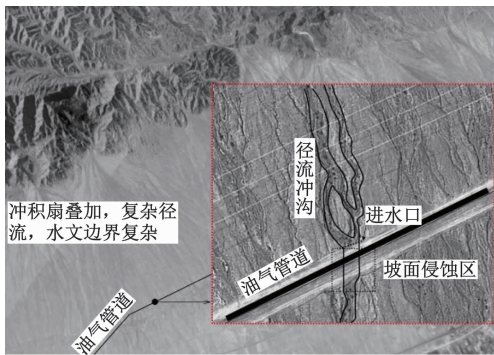


图 1 侵蚀单体评价模型

Fig. 1 Evaluation model of erosion monomer

本研究借助 GIS 软件,以青海省乌兰县希里沟山前冲积扇为例,结合西气东输油气管道,进行遥感解译,并进行现场调查,获取抗冲性、渗透性、坡度等 7 类指标因子,建立数据库,加权叠加分析指标因子对管线的影响。对冲积扇的研究有一定的借鉴意义。

### 1 研究区概况

乌兰沟山前冲积扇,位于青海省海西州乌兰县城东南约 22 km 处,该扇面积约 83 km<sup>2</sup>,海拔 2 988 ~

4 317 km(图 2)。青海省及临区大陆地壳具有平面分块性, 竖直分层性特征,该扇属于柴达木—昆仑区,按照地层和空间展布特点,该冲积扇位于欧龙布鲁克分区。地层主要为震旦系全吉群、中寒武统、上寒武统、下奥陶统多泉山组,主要岩性为灰岩、白云岩、石英砂砾岩、页岩等。位于柴达木北缘褶皱带与残山断褶带间,构造地质作用强烈。第四系主要为间歇性河相沉积,经出水口呈喇叭状分布,扇顶物质较粗,主要为砾、砂,分选较差,最大粒径达 2.7 m,随着水流搬运能力向扇边缘减弱,堆积物质逐渐变细,分选也较好,为沙、粉沙、亚黏土。第四系沉积垂直方向上具粗细相间的沉积韵律,呈多层结构。

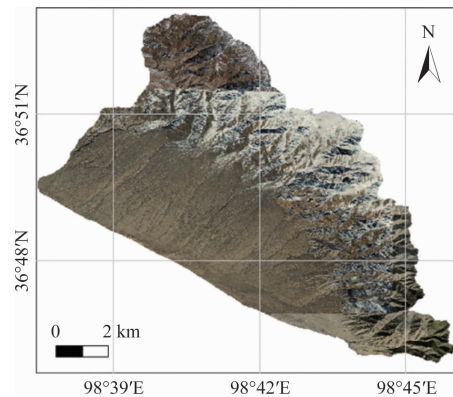


图 2 区域地理概况

Fig. 2 Regional geography

西气东输油气管道西一线、西二线穿越该冲积扇, 穿越长度约 12.2 km,两线相距 25 m。坡面侵蚀对管线影响较大<sup>[6]</sup>。本研究试验点选在西一线上。

### 2 数据收集与处理

浅沟侵蚀在坡面侵蚀中占有重要地位,是坡面侵蚀预报必须考虑的重要方面。在该冲积扇的野外调查中,沿西一线选取 40 条浅沟冲开处作为试验点。

#### 2.1 收集各指标因子

在管堤附近做现场试验,提取因子包括抗冲性、渗透性、休止角、管线与沟道夹角、植被覆盖率。现场通过调查,选取典型断面,确定每个侵蚀单体的进山口,通过泥痕法确定水量,室内通过谢才公式验证野外数据的准确性。现场通过地质罗盘,选取与观测者眼睛高度基本一致的标杆,进行测量侵蚀单体的坡度。

#### 2.2 数据处理

数据主要包括栅格数据和矢量数据,栅格数据主要是遥感影像、数字高程模型<sup>[7]</sup>(图 3)。将冲积扇遥感图、管线、调查点矢量化(图 4),建立数据库,方便属

性查询<sup>[8-9]</sup>。

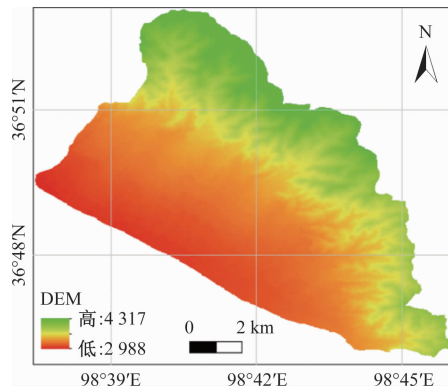


图 3 冲积扇 DEM 图

Fig.3 DEM of alluvial fan

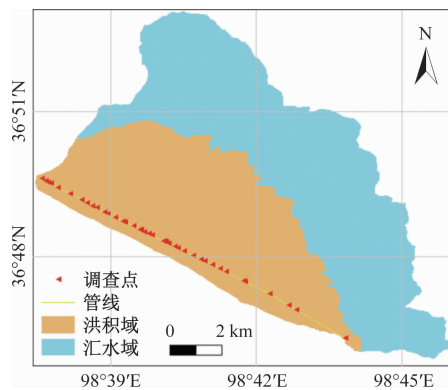


图 4 研究区矢量化

Fig.4 Vectorization of research area

### 3 层次分析法确定权重

层次分析法 (AHP) 比较适合处理难以量化的复杂问题,是由美国运筹学家 T. L. Satty 于 20 世纪 70 年代初提出的一种系统分析方法。

#### 3.1 构造层次结构

通过分析冲积扇的灾害特征,坡面流侵蚀程度作为目标层,选择地表性质  $B_1$ 、地形与相对位置  $B_2$ 、水文条件  $B_3$ 、植被  $B_4$  四类作为准则层<sup>[10]</sup>。地表性质进一步细分为地表抗冲性  $C_1$ 、渗透性  $C_2$ 、休止角  $C_3$  三类;地形与相对位置可分为冲积扇的坡度  $C_4$  及管线与沟道的夹角  $C_5$ ;水文条件主要考虑出水口来水量  $C_6$ ;植被通过植被覆盖率  $C_7$  来表示。分析系统中各要素的关系,建立系统的递阶层次结构<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 构造成对比较矩阵

由熟悉冲积扇坡面侵蚀的专家,根据各因子的重要性,运用 1~9 标度进行量化(表 1),假定  $B$  层中因素  $B_i$  与下一层次中因素  $C_1, C_2, \dots, C_n$  有联系,进行一

一对比,则可构造判断矩阵(表 2~4)。采用求和法:(1)判断矩阵每一列归一化;(2)对归一化的矩阵,再按行求和得到;(3)将求和后的向量归一化后为特征向量;(4)求最大特征根  $\lambda_{max}$ ; (5)最大特征根  $\lambda_{max}$  对应的特征向量归一化后,就是下一层因子对于上一层因子的权重。

#### 3.3 一致性检验

根据判断矩阵阶数,查随机一致性指标  $RI$ ,并计算比值  $Ic/RI$ ,进行一致性检验,检验结果见表 5。  $Rc < 0.1$ ,表明各判断矩阵的一致性均在可接受的范围内。对最大特征值归一化后,为各因子的权重值(表 6)。

表 1 指标取值范围

Table 1 Value range of index

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有同等重要性
3	表示两个因素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 $a_i$ 与 $a_j$ 的重要性之比为 $a_{ij}$ , 那么因素 $a_j$ 与因素 $a_i$ 重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

表 2 准则层判断矩阵

Table 2 Judgement matrix table of rule hierarchy

A	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$B_1$	1	1/3	2	7
$B_2$	3	1	4	6
$B_3$	1/2	1/4	1	4
$B_4$	1/7	1/6	1/4	1

表 3  $B_1$  与  $C_1 - C_3$  判断矩阵表

Table 3 Judgement matrix table of  $B_1$  and  $C_1 - C_3$

$B_1$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
$C_1$	1	3	5
$C_2$	1/3	1	2
$C_3$	1/5	1/2	1

表 4  $B_2$  与  $C_4 - C_5$  判断矩阵表

Table 4 Judgement matrix of  $B_2$  and  $C_4 - C_5$

$B_2$	$C_4$	$C_5$
$C_4$	1	2
$C_5$	1/2	1

表 5 一致性检验参数表

Table 5 Parameter of consistency checks

	$\lambda_{max}$	n	Ic	RI	Rc
A	4.174	4	0.058	0.90	0.064
$B_1$	3.004	3	0.002	0.58	0.003

$Rc = Ic/RI, Ic = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$ , RI 的值可以查询一致性指标

表 6 因子权重值表  
Table 6 Weight of factors

因子分类	影响因子	权重值
地表性质 $B_1$	抗冲性 $C_1$	0.174
	渗透性 $C_2$	0.062
	休止角 $C_3$	0.033
地形与位置关系 $B_2$	坡度 $C_4$	0.351
	管线与沟道夹角 $C_5$	0.175
水文条件 $B_3$	进水口来水量 $C_6$	0.153
植被 $B_4$	植被覆盖率 $C_7$	0.052

### 4 基于 GIS 对管道工程区分析

ArcGIS 的叠加分析功能,包括各种遥感数据、航测数据等,叠加分析的前提是将其转换为统一的栅格数据格式,且各个叠加层必须具有统一的地理空间,即具有统一的空间参考(包括地图投影、参考椭球体、基准面等),统一的比例尺及统一的分辨率<sup>[12]</sup>。叠加分析的目的是分析在空间位置上有一定关联度空间对象的空间特征和专题属性之间的相互关系,其结果不仅可以产生新的空间关系,还可以生成新的属性特征关系,能够发现多层数据间的相互联系和变化等特征,可以提取大量的隐含信息<sup>[13-14]</sup>。

#### 4.1 指标因子转换

本研究中的栅格、矢量数据均采用同一坐标投影(WGS-1984-UTM-Zone-47N)。借助 GIS 软件,进行几何校正,投影坐标系的转换。然后通过空间数据库,将调查点抗冲性、渗透性、休止角、坡度、管线与沟道夹角、来水量、植被覆盖率这七类指标,调用点要素转栅格工具,生成各因子栅格图,图 5、图 6 分别为各灾害调查点抗冲性、坡度栅格图。

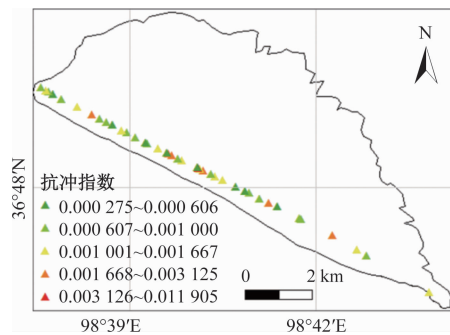


图 5 调查点抗冲性指数

Fig. 5 Anti-scourability of survey points

#### 4.2 叠加分析

加权叠加分析中,首先要对栅格图重分类<sup>[15]</sup>。然

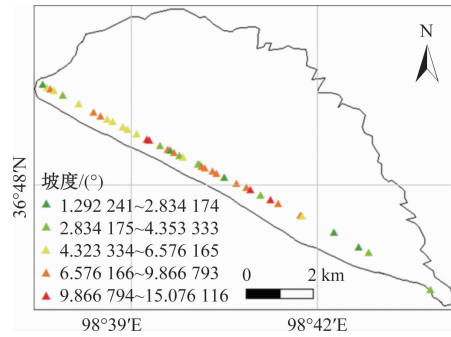


图 6 调查点坡度

Fig. 6 Slope of investigated places

后调用加权叠加工具,按照权重进行叠加分析,即可得到调查点的侵蚀强度栅格图<sup>[16-18]</sup>。将最终栅格图层按照自然断点法进行分级,划分为高、较高、中、较低、低五级,得到面流侵蚀强度等级图<sup>[19-21]</sup>(图 7)。

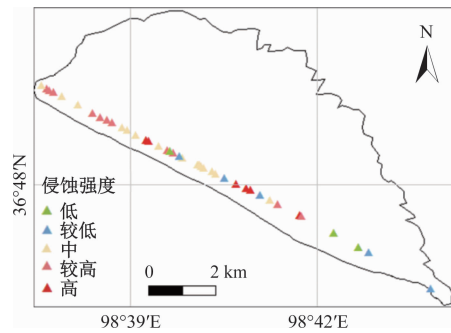


图 7 侵蚀强度等级

Fig. 7 Levels of erosion intensity

### 5 结论

通过对比叠加分析结果与现场调查的侵蚀程度,分析结果高的调查点,现场发现面流侵蚀严重,对管道危害大,有露管的趋势,需要加强人工防护。分析结果低的调查点,实际面流侵蚀较弱,对管道运营影响不大。表明利用层次分析法确定权重,借助 GIS 加权叠加在坡面侵蚀研究中值得推广。本研究得出结论:

(1) 山前冲积扇坡面侵蚀的研究中,构建了以“地表性质”、“地形与相对位置”、“水文条件”、“植被”为准则层,7 个影响因子为基础指标的侵蚀强度分析体系。结果表明,坡度所占的权重最高,达 35.1%,管线与沟道夹角、地表抗冲性所占权重相近,分别为 17.5%、17.4%,进水口水量所占权重也比较高,达 15.3%。

(2) 分析西部调查区,侵蚀强度普遍高、较高,因为该区进水口水量普遍较高,33 号沟水量最高,达

2.4 m<sup>3</sup>, 抗冲性普遍较低。向中部逐渐变较低, 进而变为中。东部调查区侵蚀强度普遍低、较低, 因为进水口水量低, 3 号沟来水量仅 0.31 m<sup>3</sup>。

(3) 本研究的借鉴意义在于, 为冲积扇各影响因子的研究提供一种新思路, 为已有油气管线运营期的主要治理区域及新管线的选址提供理论支持。将研究推广应用, 对于山前冲积扇铁路及公路的选址可以得到很好的启发。

### 参考文献:

- [ 1 ] 赖亦卡. 坡面土壤侵蚀影响因子研究进[J]. 亚热带水土保持, 2008, 20(1): 12 - 16.  
LAI Yika. Research progress on influencing factors of slope soil erosion [ J ]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2008, 20(1): 12 - 16.
- [ 2 ] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 230 - 235.  
ZHENG Fenli, GAO Xuétian. Research progress in hillslope soil erosion progresses [ J ]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(2): 230 - 235.
- [ 3 ] 陈俊杰, 孙莉英, 刘俊体, 等. 不同坡长与雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 1 - 5.  
CHEN Junjie, SUN Liying, LIU Junti, et al. Effect of slope gradient on rill erosion under different rainfall intensities and slope lengths [ J ]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(2): 1 - 5.
- [ 4 ] 李军鹏, 董卫国, 孟惠芳, 等. 降雨条件下坡面细沟侵蚀模型及临界坡度研究[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 207 - 212.  
LI Junpeng, DONG Weiguo, MENG Huifang, et al. Research of rill erosion model and critical slope gradient during rainfall [ J ]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 207 - 212.
- [ 5 ] 庞伟军, 邓清禄. 地质灾害对输气管道的危害及保护措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 114 - 120.  
PANG Weijun, DENG Qinglu. Harm of geohazards to gas pipeline and protective measures [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Contral, 2014, 25(3): 114 - 120.
- [ 6 ] 赵应奎. 西气东输三线输气管道工程线路区域地震地质环境与地质灾害[J]. 工程地质学报, 2015, 23(S): 516 - 523.  
ZHAO Yingkui. The regional seismic geological environment and geological hazards along the route of west-east gas pipeline III [ J ]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(S): 516 - 523.
- [ 7 ] 常青, 杨希, 从常奎, 等. ArcGIS 在矿山地质环境保护与治理恢复中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 131 - 134.  
CHANG Qing, YANG Xi, CONG Changkui, et al. Application of ArcGIS in mining geological environment protection and recovery [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Contral, 2014, 25(1): 131 - 134.
- [ 8 ] 沈芳, 黄润秋, 苗放, 等. 地理信息系统与地质环境评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(1): 6 - 10.  
SHEN Fang, HUANG Runqiu, MIAO Fang, et al. Geographic information system and geoenvironmental evaluation [ J ]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(1): 6 - 10.
- [ 9 ] 罗培. 基于 GIS 的地质灾害风险评估信息系统探—以重庆市为例[J]. 灾害学, 2005, 20(4): 57 - 61.  
LUO Pei. Discussion on GIS-based geological evaluation system of Chongqing [ J ]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(4): 57 - 61.
- [ 10 ] 徐存东, 连海东, 聂俊坤, 等. 基于改进层次分析法的干旱扬水罐区水土环境变迁响应评估[J]. 干旱区地理, 2015, 38(5): 880 - 886.  
XU Cundong, LIAN Haidong, NIE Junkun, et al. Response evaluation for changes of water and soil environment in arid pumping-irrigation areas based on improved analytic hierarchy process [ J ]. Arid Land Geography, 2015, 38(5): 880 - 886.
- [ 11 ] 左双英, 程欣宇, 梁风, 等. 基于 GIS 的贵阳市地质灾害危险性评价[J]. 地球与环境, 2005, 33(4): 83 - 88.  
ZUO Shuangying, CHENG Xinyu, LIANG Feng, et al. MapGIS geological hazards risk evaluation in Guiyang City on GIS [ J ]. Earth and Environment, 2005, 33(4): 83 - 88.
- [ 12 ] 吴林, 张鸿辉, 王慎敏, 等. 基于栅格数据空间分析的土地整理生态评价—以江西省南康市凤岗镇为例[J]. 中国土地科学, 2005, 19(3): 24 - 28.  
WU Lin, ZHANG Honghui, WANG Shenmin, et al. Ecological assessment in land consolidation project based on spatial analyst of grid data; a case study of Fenggang Nankang City in Jiangxi Province [ J ].

- China Land Science, 2005, 19(3): 24 - 28.
- [13] 杨海军, 邵全琴. GIS 空间分析技术与地理数据处理中的应用研究[J]. 地球信息科学, 2007, 9(5): 70 - 75.
- YANG Haijun, SHAO Quanqin. Consideration on GIS spatial analysis in geospatial data processing[J]. Geo-Information Science, 2007, 9(5): 70 - 75.
- [14] 施成艳, 鹿献章, 刘中刚. 基于 GIS 的安徽黄山市徽州地区地质灾害易发性区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 136 - 140.
- SHI Chengyan, LU Xianzhang, LIU Zhonggang. GIS-based zoning of geological hazard's susceptibility in Huizhou district of Huangshan City of Anhui Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Contral, 2016, 27(1): 136 - 140.
- [15] 许英姿, 卢玉南, 李东阳, 等. 基于 GIS 和信息量模型的广西花岗岩分布区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 693 - 703.
- XU Yingzi, LU Yunan, LI Dongyang, et al. GIS and information model based landslide susceptibility assessment in granite area of Guangxi Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(4): 693 - 703.
- [16] 张梁, 张建军. 地质灾害风险区划理论与方法[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(4): 323 - 328.
- ZHANG Liang, ZHANG Jianjun. The theory and method of risk zonation of geo-hazard [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(4): 323 - 328.
- [17] 刘航, 蒋尚明, 金菊良, 等. 基于 GIS 的区域干旱灾害风险区划研究[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 198 - 203.
- LIU Hang, JIANG Shangming, JIN Juliang, et al. A GIS-based approach to regional drought risk zoning [J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(3): 198 - 203.
- [18] 张伟朋, 谌文武, 叶飞, 等. 基于 GIS 的白龙江流域甘肃段滑坡分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(S): 1118 - 1126.
- ZHANG Weipeng, CHEN Wenwu, YE Fei, et al. Study on the distribution rules of landslides of Bailong river basin in Gansu Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(S): 1118 - 1126.
- [19] 朱良峰, 殷坤龙, 张梁, 等. 基于 GIS 技术的地质灾害风险分析系统研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 428 - 433.
- ZHU Liangfeng, YIN Kunlong, ZHANG Liang, et al. Risk analysis system of geo-hazards by using GIS technique [J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 428 - 433.
- [20] 卢全中, 彭建兵, 赵法锁. 地质灾害风险评估(价)研究综述[J]. 灾害学, 2003, 18(4): 59 - 63.
- LU Quanzhong, PENG Jianbing, ZHAO Fasuo. An overview on the study of risk assessment of geological hazards [J]. Journal of Catastrophology, 2003, 18(4): 59 - 63.
- [21] 孟祥瑞, 裴向军, 刘清华, 等. GIS 支持下基于因子分析法的都汶路沿线地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3): 106 - 115.
- MENG Xiangrui, PEI Xiangjun, LIU Qinghua, et al. GIS-Based susceptibility assessment of geological hazards along the road from Dujiangyan to Wenchuan by factor analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Contral, 2016, 27(3): 106 - 115.