

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.10

山前冲积扇上输气管道冲沟侵蚀分形特征

吕擎峰¹,王庆栋¹,郭 轩²,王生新³,马 博¹,姜璐莎¹

(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. 南京工业大学数理科学学院,江苏 南京 211816;3. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要: 冲沟侵蚀是输气管道横穿山前冲积扇的重要地质灾害之一。通过 ArcGIS 软件的分析功能,结合输气管道工程的现场调查,确定水系阈值,对研究区 DEM 数据进行提取,获得冲积扇坡度、沟网水系、汇水流域的分布情况。基于此,统计分析冲积扇冲沟个数(N)与坡度(p)、沟长(L)、汇水流域面积(s)之间的变维分形关系。结果表明,冲沟侵蚀与坡度(p)、沟长(L)呈二阶累积和分形分布,且分维值 $D_p = 1.35 > D_L = 1.23$,坡度(p)对冲沟侵蚀的影响高于沟长(L);冲沟侵蚀与汇水流域面积(s)呈一阶累积和分布,分维值($D_s = 0.39$)较小,汇水流域面积(s)对冲沟侵蚀的影响较弱。这一结果为山前冲积扇输气管道运营期确定主要巡查区域提供了理论依据。

关键词: GIS;冲积扇;冲沟侵蚀;坡度;变维分形

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)05-0059-06

Fractal characteristics of gully erosion for gas pipelines crossed alluvial fan

LYU Qingfeng¹, WANG Qingdong¹, GUO Xuan², WANG Shengxin³, MA Bo¹, JIANG Lusha¹

(1. Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. College of Mathematical Sciences, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 211816, China; 3. Geological Hazards Research and Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Gully erosion is one of the important geological disasters in gas pipeline across the alluvial fan. Through the analysis by ArcGIS, combining with field investigation of gas pipeline engineering, drainage threshold was determined, and information from DEM of study area was extracted, such as distribution situation of slope, gully network, watershed zone. Further more, statistics and analysis of the variable dimension fractal relationship between the number (N) of alluvial fan flows and slope (p), gully length (L), as well as watershed area (s) were conducted. The results show that it is in second-order cumulative total fractal distribution between gully erosion and slope (p), gully length (L), and the fractal dimension value $D_p = 1.35 > D_L = 1.23$. It indicates that the influence of slope (p) on the gully erosion is higher than the gully length (L). It is in one-order cumulative total fractal distribution with watershed area (s), and the value of fractal dimension ($D_s = 0.39$) is small, so watershed area is weak to the gully erosion. The conclusion can provide reference for the main inspection area of pipeline crossed alluvial fan in operation period.

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

分形的概念是美籍数学家 Mandelbrort 首先提出的,1975 年,他创立了分形几何学。在此基础上形成

了研究分形性质及应用的学科,称为分形理论。分形具有的特征是自相似性、自仿射性、无标度性^[1-2]。

收稿日期: 2018-03-16; 修订日期: 2018-04-08

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,从事地质灾害与岩土工程方面的研究。E-mail: lvqf@lzu.edu.cn

分形理论逐渐成为解决复杂问题的有力工具,广泛应用于水系的研究中。早期何隆华等提出了水系分维的含义,对河长和河网结构的分维进行了探讨指出水系的分维反映了地貌侵蚀发育的阶段^[3-4];雷会珠等^[5]通过分形理论,统计分析了流域边界周长、长短轴比、汇合角等地貌因子与流域面积的关系;张少文等^[6]较系统的论述了分形理论在水系河网结构和流域地形地貌及其演变、河床表面形态、径流过程等水文水资源中的应用;后期国内外学者通过试验,依据分形理论,对流域地貌形态特征与侵蚀关系进行了研究^[7-9];李精忠等^[10]通过在汇水量的无标度区间内通过谷底线长度与汇水量阈值的线性拟合,计算谷地的长度分维;随着 GIS 模块功能的不断完善,将 GIS 引入水系研究中成为人们关注的热点,范林峰等^[11]基于 GIS 技术,提出了水系三维分形计盒维数的计算方法,并验证了该方法的可靠性。分形理论应用于水系的研究已经较多,而结合已有油气管道研究冲沟侵蚀的相对较少。

西部输气管道常常穿越山前大型冲积扇,冲沟侵蚀十分发育,占有地质灾害的 40.9%,冲沟形态复杂,呈网状、树枝状^[12-13]。冲沟侵蚀与坡面地貌有着密切的联系,哪些指标对冲沟侵蚀的影响起主要作用或次要作用,用传统的定性方法很难找到答案。由于冲沟是由主沟及支沟组成的网络系统,具有典型的自相似性,因此可以进行分形分析。本文利用 ArcGIS 软件,结合对研究区输气管道灾害点的现场调查,确定水系的阈值,获得冲积扇沟网结构,提取坡度及冲积扇的汇水流域。通过累计和变换分形理论,研究了冲沟侵蚀与坡面地貌因子的关系。

1 研究区概况

研究区位于青海省乌兰县茶卡镇西南约 20 km 处的冲积扇,地处 98°49'~99°09'E,36°28'~36°42'N,东西宽约 31 km,面积约 495 km²。该扇地形起伏变化较大,海拔 3 070~4 840 m,年均降雨量 17.6~764 mm,为典型的高原大陆性气候,以四季不分明、低温多变、干燥多风、蒸发量大、高寒缺氧、日照长、辐射强为其特点。

按照地层和空间展布特点,该扇位于柴达木北缘分区。地层主要有震旦系全吉群、长城系、蓟县系,主要岩性为花岗岩、石英砂砾岩、白云岩、片麻岩、页岩等。地处残山断褶带间,构造作用强烈。冲积扇表面主要为第四纪间歇性河相沉积,由扇顶向扇缘颗粒逐

渐变小,扇顶堆积主要为卵、砾,分选性差,随着水流的搬运能力的减弱,扇前缘段主要为细砂、粉砂、黏土。地表被水流冲刷,有些沟道贯穿整个冲积扇,这样的沟道侵蚀程度较大;有些沟道则由坡面局部汇流形成,其侵蚀程度相对较小。

西气东输管道西一线、西二线穿越该冲积扇,穿越长度约 27 km,两线相距 18 m。冲沟对管道进行不同程度的破坏,本文对西一线 47 个灾害点进行了调查。

2 地貌因子

对冲积扇输气管道冲沟侵蚀进行调查,结合已有的研究^[14-17],利用 ArcGIS 软件的分析功能,本文主要从坡度(p)、沟长(L)、汇水面积(s)这 3 项指标研究冲沟侵蚀与地貌的分形关系。

2.1 坡度提取

利用 GIS 软件提取坡度,需要以米为单位的投影坐标系,因此所有的栅格数据均需坐标转换,采用同一坐标投影(WGS-1984-UTM-Zone-47N)^[18-19]。利用 GIS 软件,加载数据,进行地理配准,几何纠正,然后利用坡度提取工具,得到冲积扇的坡度(p)(图 1)。

2.2 河网沟长提取

在 ArcGIS 软件的水文扩展分析模块下,首先对 DEM 数据进行洼地填平,得到无洼地的 DEM 数据。然后利用水文分析工具,生成流向栅格。其原理是通过计算 DEM 数据与其相邻的 8 个栅格单元间的落差值,然后按照坡度最陡原则确定水流方向。最后计算汇流累积量^[20-22],当汇流累积量达到某一阈值时,该栅格就会出现在河道上,出现在河道的栅格赋值为 1,小于特定阈值的赋值为 0,这样就生成了连续的水流线,从而得到河流网络栅格。汇流量的阈值需要结合实际管道灾害调查资料,进行多次尝试,确定适当的阈值。考虑到坡面局部汇流,也能对管道运营造成影响,因此阈值确定为 80。对确定的河网矢量化,并进行平滑处理。最后利用 Upstream 选项,计算水流长度。在本文中,水流冲刷形成沟道,因此水流的长度代表沟长(L)(图 2)。

2.3 汇水区域的生成

在 GIS 中对于汇水区域的划分,都是基于 DEM 数据计算的(非指定外部倾泻点),一般用作小流域的提取。汇水区域的意义在于水文的相关性,流域面作为空间范围,可以圈定该空间位置的一切地理要素、时空要素与水系之间的关系。汇水区域是由分水岭分割而成的集水区,可利用水流方向确定出相互连接并处于同

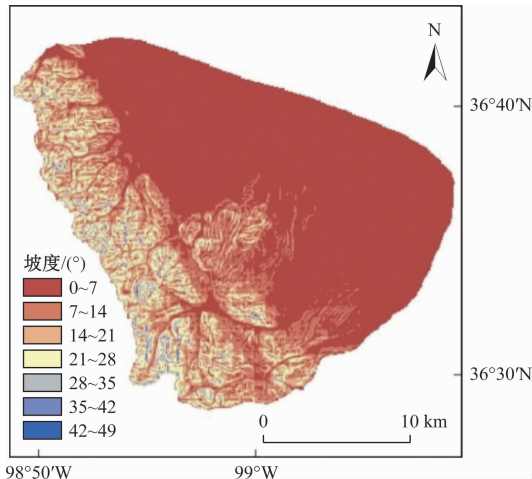


图 1 研究区坡度
Fig. 1 Slope of study area

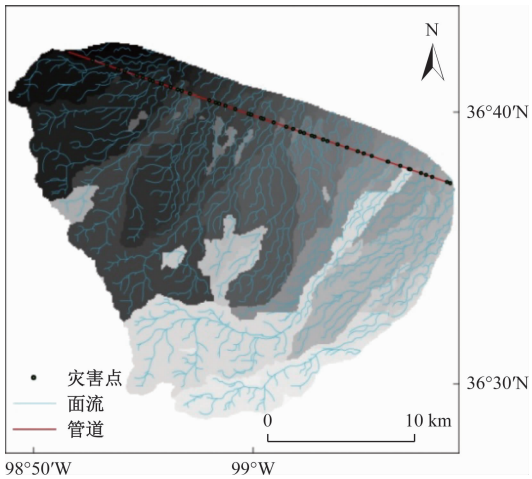


图 3 汇水区域分布图
Fig. 3 Distribution area of watershed

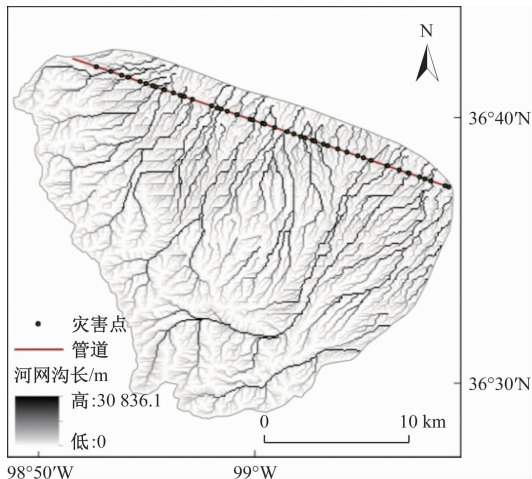


图 2 坡面沟长
Fig. 2 Length of surface gully

一流域盆地的栅格区域,通过 Basin 工具可以计算汇水区域。再通过栅格转面工具,就可以将汇水域矢量化。图 3 为矢量河网数据与汇水区域在同一窗口显现。

3 冲沟侵蚀分形特征

3.1 累计和变换分形理论

在自然界中,不规则现象广泛存在,但几乎没有完全满足常维分形的,因此,我国学者付昱华^[23]提出了“变换形成的分形”和“累计和系列变换”的方法。任意函数都可以通过一系列 1 阶、2 阶、…、n 阶的变换,分别建立各阶累计和的变维分形模型,然后筛选出最优的效果,作为其分形维数。累计和变换分形主要通过以下四个步骤:

步骤 1:确定原始数据 $(N_i, r_i) (i = 1, 2, \cdots, n)$, 建立 $\ln N_i$ 和 $\ln r_i$ 的双对数坐标系,利用式(1)计算相邻两点间的斜率的相反数,即为研究对象的变段分维值 $D_{i,i+1}$ 。

$$D_{i,i+1} = \ln(N_i/N_{i+1})/\ln(r_{i+1}/r_i) \tag{1}$$

步骤 2:

$$\{N_i\} = \{N_1, N_2, N_3, \cdots\} \tag{2}$$

在(2)式的基础上,按式(3)、(4)构造各阶累计和序列:

$$\{S1_i\} = \{N_1, N_1 + N_2, N_1 + N_2 + N_3, \cdots\} (i = 1, 2, 3, \cdots, n) \tag{3}$$

$$\{S2_i\} = \{S1_1, S1_1 + S1_2, S1_1 + S1_2 + S1_3, \cdots\} (i = 1, 2, 3, \cdots, n) \tag{4}$$

式中, S1, S2, S3, …是指 1, 2, 3, …阶累计和序列。

步骤 3:建立各阶累计和的变维分形模型,并将各阶累计和数据点绘制在双对数坐标系下。

表 1 冲沟侵蚀与坡度的分段变维维数计算结果
Table 1 Computed segmentation variable dimension value between gully erosion and slope

坡度 $p/(\circ)$	r	N	$D_{i,i+1}$	$S1_i$	$D1_{i,i+1}$	$S2_i$
0 ~ 7	1	19	0. 926	19	- 0. 610	19
7 ~ 14	2	10	0. 881	29	- 0. 533	48
14 ~ 21	3	7	1. 167	36	- 0. 451	84
28 ~ 35	4	5	2. 291	41	- 0. 318	125
35 ~ 42	5	3	2. 225	44	- 0. 242	169
21 ~ 28	6	2	4. 5	46	- 0. 143	215
42 ~ 49	7	1	—	47	—	262

利用式(1)计算相邻点间的斜率,取其相反数即为该阶累积和的变段分维数。

步骤 4:确定最优模型,即直线拟合最好的一次累

计,并计算斜率,即为分维值 D 。

3.2 主沟各地貌指标与冲沟侵蚀分形关系

在变换分形过程中,同一地貌指标进行分类或分级,统计该状态下侵蚀沟道的数目,对各状态下的数量按照由大到小进行排列,分别编号 $r = 1, 2, 3, \dots, 7$ 。表 1 为冲沟侵蚀与坡度的分段变维维数计算结果,冲沟侵蚀主要发育在 $0^\circ \sim 14^\circ$ 坡度区间,占总数的 61.7%。规定用 N 表示沟道数目(个),一阶和二阶累计和分别用 $S1$ 、 $S2$ 表示。图 4~图 6 分别为冲沟侵蚀与坡度(p)、沟长(L)、汇水域面积(s)的变维分形关系。

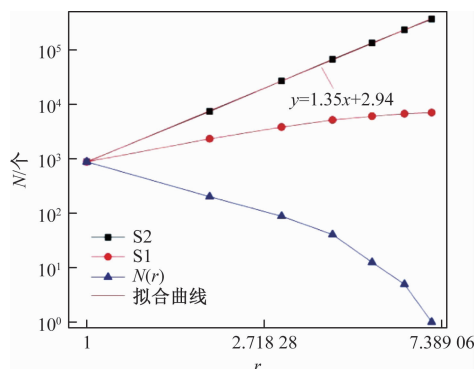


图 4 冲沟侵蚀与坡度的变维分形关系

Fig. 4 The relationships of variable dimension fractal between gully erosion and slope

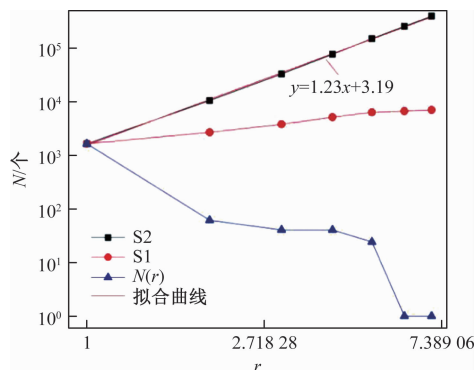


图 5 冲沟侵蚀与沟长的变维分形关系

Fig. 5 Variable dimension fractal curves of gully erosion vs. gully length

3.3 分维值的意义探讨

分形维数是描述分形结构的定量参数^[24],反映了冲沟侵蚀分布自相似特征的程度,本质上能够体现冲沟侵蚀与坡度(p)、沟长(L)、汇水域面积(s)各项地貌指标在结构上的复杂程度。具体表现在:随着变换阶数越高,各指标对冲沟侵蚀的影响机制越复杂;分维值越大,影响程度越强。

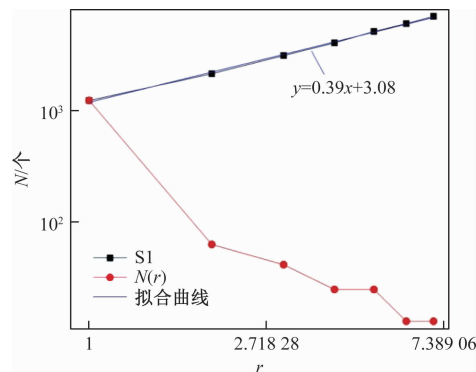


图 6 冲沟侵蚀与汇水域面积的变维分形关系

Fig. 6 Curves of variable dimension fractal of gully erosion varied with area of watershed

冲沟侵蚀程度与坡度(p)、坡长(L)呈二阶累计和分形分布,变维分形特征复杂,分维值也较大,表明这两项指标对冲沟侵蚀影响较大,是控制冲沟侵蚀的主要因素,坡度(p)对冲沟侵蚀的控制作用最为复杂,影响程度高于坡长(L);冲沟侵蚀程度与汇水面积(s)呈低阶累计和分形分布,分维值相对较小,变维分形特征相对简单,说明该指标对冲沟侵蚀的控制程度较弱(表 2)。

表 2 冲沟侵蚀与地貌指标分形汇总表

Table 2 The fractal summary table of gully erosion and geomorphological index

地貌指标	累计变换次数	分维值 D
坡度(p)	2	1.35
沟长(L)	2	1.23
汇水域面积(s)	1	0.39

4 结论

本文通过利用 GIS 的水文分析功能,结合管道现场调查,获取研究区的坡度(p)、沟长(L)、汇水域面积(s)3 项地貌指标,运用累计和变换分形理论,研究了冲积扇输气管道冲沟侵蚀与地貌因子的变维分形特征,得出以下结论:

(1) 冲沟侵蚀与坡度(p)、沟长(L)、汇水域面积(s)3 项地貌指标均有变维分形的特征,这些指标在一定程度上控制着冲沟侵蚀的发育程度。

(2) 冲沟侵蚀与坡度(p)、沟长(L)呈现二阶累计和分形分布,说明这两项指标对冲沟侵蚀的控制作用最为复杂,且坡度分维值($D_p = 1.35$) > 沟长分维值($D_L = 1.23$),表明坡度对冲沟侵蚀的影响高于沟长。

(3) 冲沟侵蚀与汇水域面积(s)呈一阶累计和分形分布,分维值($D_s = 0.39$)较小,表明汇水域面积对

冲沟侵蚀的影响较弱。

(4) 本文为研究山前冲积扇输气管道冲沟侵蚀与地貌因子的复杂关系提供一种新思路。可以根据对冲积扇地貌的初判,对输气管道运营期的主要治理区域提供一定的依据。

参考文献:

- [1] 张捷,包浩生. 分形理论及其在地貌学中的应用—分形地貌学研究综述及展望[J]. 地理研究,1994,13(3):104-112.
ZHANG Jie, BAO Haosheng. Fractal geomorphology-review and prospect [J]. Geographical Research, 1994,13(3):104-112.
- [2] 姜恩三,任光明,陈锦涛. 四川省普格县地质灾害发育的分形特征[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):122-126.
JIANG Ensan, REN Guangming, CHEN Jintao. The fractal characteristics of the geological hazards development of Puge County Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016,27(3):122-126.
- [3] 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.
- [4] 冯平,冯焱. 河流形态特征的分维计算方法[J]. 地理学报,1997,52(4):324-330.
FENG Ping, FENG Yan. Calculation on fractal dimension of river morphology [J]. Acta Geographica Sinica, 1997,52(4):324-330.
- [5] 雷会珠,武春龙. 黄土高原分形沟网研究[J]. 山地学报,2001,19(5):474-477.
LEI Huizhu, WU Chunlong. Fractal channel networks on loess plateau [J]. Mountain Research, 2001,19(5):474-477.
- [6] 张少文,王文圣,丁晶,等. 分形理论在水文水资源中的应用[J]. 水科学进展,2005,16(1):141-146.
ZHANG Shaowen, WANG Wensheng, DING Jing, et al. Application of fractal theory to hydrology and water resources [J]. Advances in Water Science, 2005,16(1):141-146.
- [7] 崔灵周,李占斌,朱永清,等. 流域地貌分形特征与侵蚀产沙定量耦合关系试验研究[J]. 水土保持学报,2006,20(2):1-4,9.
CUI Lingzhou, LI Zhanbin, ZHU Yongqing, et al. Experimental study on quantitative coupling relationship between topographic fractal feature and sediment yield in small watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006,20(2):1-4,9.
- [8] 薛海,孔纯胜,熊秋晓,等. 坡面沟蚀及其分形特性试验研究[J]. 人民黄河,2008,30(12):90-93.
XUE Hai, KONG Chunsheng, XIONG Qiuxiao, et al. Test and study on slope ditch erosion and its characteristics of shaping [J]. Yellow River, 2008,30(12):90-93.
- [9] JOANNA Fac-beneda. Fractal structure of the Kashubian hydrographic system [J]. Journal of Hydrology, 2013,488:48-54.
- [10] 李精忠,刘剑伟,杨泽龙. DEM数据谷地分维值的估算[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2014,39(11):1277-1281.
LI Jingzhong, LIU Jianwei, YANG Zelong. Estimating the fractal dimension value of valley based on DEM data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014,39(11):1277-1281.
- [11] 范林峰,胡瑞林,张小艳,等. 基于GIS和DEM的水系三维分形计盒维数的计算[J]. 地理与地理信息科学,2012,28(6):28-30.
FAN Linfeng, HU Ruilin, ZHANG Xiaoyan, et al. Calculation of 3D box dimension of river system based on GIS and DEM [J]. Geography and Geo-Information Science, 2012,28(6):28-30.
- [12] 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.
- [13] 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 Control, 2014,25(3):114-120.
- [14] 程根伟,肖飞鹏,范继辉. 山区小流域坡面和沟道侵蚀的数学模式探讨[J]. 山地学报,2010,28(3):327-332.
CHENG Genwei, XIAO Feipeng, FAN Jihui. Exploration in mathematic models on the slope and

- stria erosions for small watershed in mountainous region[J]. Mountain Research, 2010, 28(3): 327-332.
- [15] 方琼,段中满. 湖南省地形地貌与地质灾害分布关系分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 83-88.
- FANG Qiong, DUAN Zhongman. Distribution analysis of topography and geological hazards in Hunan Province[J]. The Chinese Journal of Hazard and Control, 2012, 23(2): 83-88.
- [16] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154+182.
- LI Guifang, ZHENG Fenli, LU Jia, et al. Effect of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 147-154+182.
- [17] 方浩. 川气东送管道工程沿线地质灾害及防治对策分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(3): 46-50.
- FANG Hao. Analysis on the geological hazards and their prevention measures along the Sichuan-to-East gas transmission pipeline project[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(3): 46-50.
- [18] 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.
- [19] 曹峰,郑跃军. 基于 GIS 技术的人工补给地下水区域选择——以乌鲁木齐河流域乌拉泊洼地为例[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 44-50.
- CAO Feng, ZHENG Yuejun. A study of suitable area selection for artificial recharge based on GIS technology: Take Wulabo basin as case study[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 44-50.
- [20] 张建兴,马孝义,赵文举,等. 黄土高原重点流域河网分形特征研究[J]. 泥沙研究, 2008, 1(5): 9-14.
- ZHANG Jianxing, MA Xiaoyi, ZHAO Wenju, et al. Analysis on fractal characteristics of river networks of key watersheds in the loess plateau[J]. Journal of Sediment Research, 2008, 1(5): 9-14.
- [21] 张莉,张青峰,郑子成,等. 基于 M-DEM 的黄土人工锄耕坡面水系分维特征研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 7-11.
- ZHANG Li, ZHANG Qingfeng, ZHENG Zicheng, et al. M-DEM-based stream fractal dimension of artificial backhoe cultivated loess slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 7-11.
- [22] 原晓平,刘少峰,田贵中,等. 基于 DEM 的格尔木河流域水系分维分析[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 111-116.
- YUAN Xiaoping, LIU Shaofeng, TIAN Guizhong, et al. Analysis of the fractal dimension in the Golmud river basin based on DEM[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2013, 25(1): 111-116.
- [23] 付显华. 变换形成的分形与海洋环境数据分析预测[J]. 海洋通报, 2000, 19(1): 79-88.
- FU Yuhua. Transform-formed fractals and analyses and forecast of marine environment data[J]. Marine Science Bulletin, 2000, 19(1): 79-88.
- [24] 龙腾文,赵景波. 基于 DEM 的黄土高原典型流域水系分形特征研究[J]. 地球与环境, 2008, 36(4): 304-308.
- LONG Tengwen, ZHAO Jingbo. A study on the fractal properties of a typical drainage basin on the loess plateau based on DEM[J]. Earth and Environment, 2008, 36(4): 304-308.