

胶东半岛丘陵区冲沟分形特征及其影响因素研究

王 涛¹, 何福红¹, 顾丽娟², 张振华¹, 吴孟泉¹

(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 海军航空工程学院基础部, 山东 烟台 264001)

摘要: 以胶东半岛丘陵区 7 个集水区为研究对象, 采用 SA 模型提取研究区冲沟系统, 测算各集水区冲沟沟长盒维数, 分析沟长分形特征及其与地形参数和土地利用类型间的关系, 厘定研究区内冲沟发育演化的特征及规律。结果表明: (1) 东部构造活动性强的隆起区分维值明显高于西部构造活动性弱的沉积凹陷区, 沟长分形特征主要受区域地质构造控制。 (2) 沟长分维数与平均坡度、地表粗糙度、剖面曲率、沟壑密度和沟头密度等地形参数之间相关性显著, 而与集水区面积和沟长没有相关性。 (3) 沟头密度、沟壑密度与沟长分维数间具有极显著正相关性, 相关系数分别为 0.982 4, 0.975 3, 是表征沟谷分形特征的重要参数, 可作为估算区域沟谷分形特征和分形维数的简单指标。 (4) 沟长分维数与集水区内存草地比存在较显著正相关性, 与丘陵旱地比具有较显著的负相关性, 相关系数分别为 0.893 和 -0.919 8, 表明冲沟展布形态特征同地质构造控制下的大的地貌轮廓关系密切, 与人类改造地表形成的微地貌关系不大。

关键词: 冲沟; SA 模型; 分形; 盒维数; 胶东半岛丘陵区

中图分类号: S151.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0266-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.044

Characteristics and Influencing Factors of Gully Morphology Fractal Dimension in Hilly Area of Jiaodong Peninsula

WANG Tao¹, HE Fuhong¹, GU Lijuan², ZHANG Zhenhua¹, WU Mengquan¹

(1. College of Resource and Environment Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025;

2. Institute of Systems Science and Mathematics, NAAU, Yantai, Shandong 264001)

Abstract: Selecting the seven small catchments in Jiaodong Peninsula as the study area, the gully system was extracted using the SA model, and the fractal dimensions of the gully system were calculated by boxcounting method. The gully fractal characteristics and the coupling between the fractal dimensions of gully lengths and terrain parameters, and the land use types were analyzed to determine the characteristics of the gully evolution. The results showed that: (1) The fractal dimension of gully length in mountain watershed was larger than that in farming area, indicating the fractal feature of gully length was mainly controlled by the geological structure of the basin. (2) The gully-head density, ravine density, surface roughness, profile curvature, and terrain average gradient were found to have significant positive correlation with fractal dimension of gully length in the study catchments, while correlation between the area of catchment and the length of gully was insignificant. (3) There was significant positive correlation between the fractal dimension of gully length and the gully-head density, ravine density, with the correlation coefficients of 0.982 4 and 0.975 3, respectively, indicating that gully-head density and ravine density were the important parameters of the fractal characteristic of the valleys, as simple indicators for estimating regional gully fractal characteristics and the fractal dimension. (4) There was significant positive correlation between the fractal dimension of gully length and the forest-grassland ratio and hilly area ratio, with the correlation coefficients of 0.893 and -0.919 8, respectively, indicating that the characteristics of the gully evolution were closely related to the large topographic contour under the control of geological structure, while little relation to the micro topography formed by the process of human activity.

Keywords: gully; slope area topographic index models; fractal; box dimension; hilly area of Jiaodong Peninsula

收稿日期: 2016-05-10

资助项目: 国家自然科学基金(41471223); 山东省自然科学基金(ZR2014JL026); 山东省高等学校科技计划项目(J15LH51); 烟台市科技计划项目(2015ZH091)

第一作者: 王涛(1975—), 男, 山东莱州人, 硕士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与 3S 技术应用。E-mail: wt641@163.com

通信作者: 何福红(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与 3S 技术应用。E-mail: fuhonghe112@126.com

沟蚀是指汇集在一起的地表径流冲刷破坏土壤及其母质,形成切入地表以下沟壑的土壤侵蚀形式。沟蚀作为一种常见的土壤侵蚀类型,虽不如面蚀涉及面广,但因其侵蚀量大、速度快,沟谷地貌充分发育,使耕地面积减少,对农业生产的危害十分严重,已成为江河泥沙的一个主要来源^[1-2]。沟谷地貌作为一种重要的地貌类型,是在一定地质构造(内力)和自然环境(外力)作用下^[3],形成的由主沟及各级子沟组合的不规则体,其展布形状具有自相似性,依据测量尺度的大小,其沟谷长度具有不确定性,为沟谷地貌的研究带来困惑^[4]。分形理论是研究自然界具有自相似性的理论和方法,被广泛应用于水系和海岸岸线等典型水蚀地貌的研究,且成果颇丰^[3,5-7]。相对大尺度河谷而言,小尺度冲沟系统形成和发育的地质内力和外力(流水、人类)作用更为复杂,冲沟展布的形态特征更复杂,部分学者也曾将分形理论引入到冲沟沟头及沟道形态特征的研究,从多个角度探讨了沟谷系统的形态特征^[8-10],但很少涉及冲沟分形特征同地形参数及土地利用类型间的关系。沟头和沟长是冲沟监测和研究的 2 个关键因子,沟头是沟蚀地貌中发育最活跃的部位^[2],而沟长不仅是 EGEM 和 WEPP 水土流失模型中的重要输入参数^[11],也是估算冲沟土壤侵蚀量经验公式的直接参数^[12]。研究集水区内沟长分形特征及其规律,能够从形态学揭示冲沟沟蚀发育特征及规律,丰富沟蚀研究内容。基于此,本文以胶东半岛丘陵区栖霞市庵里水库西岸 7 个集水区为研究对象,采用 SA 地形阈值模型来实现定位冲沟沟头并计算沟长,计算各集水区沟长的计盒维数,分析集水区冲沟的分形特征。基于相关分析法,分析集水区沟长分形特征同地形、土地利用类型等因子之间的联系,揭示研究区内冲沟发育演化的特征及规律。

1 研究区概况和数据来源

研究区位于山东省栖霞市庵里水库西缘流域,经纬度范围为 $37^{\circ}20'30''-37^{\circ}22'30''\text{N}$, $120^{\circ}48'-120^{\circ}51'\text{E}$,流域面积 24.06 km^2 ,平均海拔约 175 m 。研究区气候属温带季风型湿润气候,年平均温度 $11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降雨量 770 mm 左右,年际变化较大,降雨多集中于夏季,且多暴雨,干燥度 $0.8\sim 1.0$ 。研究区内地层及岩性为白垩系砂砾岩、新元古界蓬莱群泥灰岩、青白口系豹山口组板岩、片岩、大理岩,岩性松散^[13]。各集水区内土壤以棕壤为主,褐土、河潮土次之,且呈现垂直分布性:山区为棕壤性土,山地中下部为典型棕壤,最低处为潮棕壤和河潮土。区内断裂构造、褶皱构造、韧性剪切带发育,断裂多 NE 走向,其中,大的断裂有栖霞断裂和台前断裂,小断裂有寨里—杨础断裂

和霞址—乔家断裂^[13],直接控制流域南北两界。流域内河流主要为季节性沟道,沟底为冲积平原,分布有村落及农田。在研究流域内选择 7 个集水区作为研究对象(编号为 1—7),各集水区分布于庵里水库西岸的马家疃—盛家—北岩子口村—宫后村及寨山东岸、南岸。同时,所有研究集水区均汇流于庵里水库,与当地的农业生产和人们的生活息息相关。区内低山、丘陵广布,间或分布有少量的河谷平原。集水区内的土地利用类型大致分 3 种:林草地、果园和农田。地形复杂多样,岩性松散,土质瘠薄,降雨集中,因而区内冲沟侵蚀地貌发育明显,而且治理难度相对较大,保护和改善土地生态环境任务繁重。

本研究数据包括空间分辨率为 0.6 m 的航空摄影数字正射影像图(DOM, Digital Orthophoto Map)和分辨率为 5 m 的 DEM。

2 研究方法

2.1 冲沟系统提取

国内外沟蚀研究广泛采用的提取沟头的模型主要有地形指数模型(Slope Area, SA)^[14]、坡度面积乘幂模型(Slope Area Power, SAP)^[15]、湿润地形指数模型(Wetness Topographic Index, WTI)^[15]及 Compound Topographic Index(CTI)^[15]等。其中,SA 模型预测沟头和沟长的精度高于其他 3 种模型^[15]。本文基于 SA 模型提取冲沟系统,其表达式如下:

$$t = SA \quad (1)$$

式中: t 为地形参数值; S 为地形坡度(m/m); A 为汇水面积(m^2)。

冲沟沟头的产生只有当 t 的值超过某一临界阈值时才会发生,其变化范围大致在 $5\sim 50$ 之间^[14-15]。

汇水面积 A 可以借助 ArcGIS 10.1 软件中的 Hydrology 模块,基于 DEM 数据,经过对 DEM 填洼,生成的流域流向数据,并采用 accumulation 工具计算获得。地形坡度 S 使用 ENVI 4.8 的 Topo Modeling 模块中的 slope(percent)工具,对填洼后的 DEM,指定一定的窗口尺寸,依次计算 DEM 中所有像素的坡度。综合定位沟头的精度和沟谷线的连贯性,试验中采用的窗口尺寸是 13×13 。

2.2 沟长分维值的计算

本文计算冲沟和河谷分维值的方法采用计盒法^[5]。计盒法是基于分维的定义,对于给定标度为 r 的正方形网格去量测冲沟谷地线,将得到冲沟谷地线包含的网格数目为 $N(r)$,当 r 不断变化时,会得到一系列相对应的 $N(r)$ 值,二者关系为:

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (2)$$

公式(2)两边取对数,并以 $\lg r$ 和 $\lg N(r)$ 为坐标轴作双对数图,用最小二乘法可拟合出一条直线。

$$\lg aN(r)=-D\lg r+A$$

(3)

式中: A 为待定常数; D 为直线的斜率,即沟谷线的分维值,又称为豪斯道夫维数。

2.3 地形参数的选取和计算

地面坡度、地表粗糙度、地面剖面曲率、沟头密度、沟壑密度是刻画地貌形态特征的 5 个重要的地形参数。其中,地面坡度反映了地面区域内地表高程的变化率,直接影响着地表的物质流与能量流的再分配,是影响沟头发育、沟长及沟蚀产沙量强弱的关键因子。可用 ENVI 4.8 的 Topo Modeling 模块中的 slope 工具计算每个像素的坡度。

地表粗糙度反映了地表的起伏程度,是许多陆面过程的关键影响因子。地表曲面面积与其水平投影面积之比是计算地表粗糙度常用方法,见公式(4)。

$$\omega=1/\cos\theta$$

(4)

式中: ω 为地表粗糙度,取值 $[1,\infty)$; θ 为地形坡度($^{\circ}$)。

地面剖面曲率是指地面任一点位地表坡度的变化率,可以通过 slope of slope 获取剖面曲率的绝对值。

沟头密度可定义为一个特定区域内单位面积内冲沟数量。一般地,沟头密度越大,地面越破碎,区内地表物质稳定性越差,易形成地表径流而引发冲沟侵蚀。其计算公式为:

$$\sigma=N/S$$

(5)

式中: σ 为沟头密度(条/ km^2); N 为区内沟头数量(条); S 为区域面积(km^2)。

沟壑密度是指在一个特定区域内单位面积内沟壑的总长度,反映了地面被径流的切割程度。在不同的测量尺度下(无标度区),冲沟沟长存在一定的不确定性,本研究采用无标度区的测量下限 r_x 下测算出的冲沟长度(L_x)来计算沟壑密度 $p(\text{km}/\text{km}^2)$,见公式(6)。

$$p=L_x/S$$

(6)

2.4 土地利用类型的提取

作为人类改造地表的主要方式,土地利用同沟道发育、形态特征间也存在着较复杂的联系。多数学者认为,人类活动引起的土地利用变化能够显著的削弱土壤结构,降低土壤结构的稳定性,增加沟谷的泥沙侵蚀量,是引发冲沟启动和促进冲沟发育的重要因素之一^[1,16]。本文以 DOM 遥感图像为数据源,结合野外勘察,建立研究区内主要地物的遥感图像解译标志,基于 ArcGIS 分别解译并统计出各集水区内土地利用类型及比例(表 1)。其中,林草地主要包括山坡疏林地、冲沟内灌木及草地;丘陵旱地包括农耕地和果园。集水区内某种土地利用类型占集水区面积的比例称为该土地利用类型比例。

表 1 集水区内地貌、土地利用类型

编号	主要地貌类型	主要土地利用类型及比例/%
1	丘陵,岭地,沟谷,堆积平原	林草地(28.90),丘陵旱地(66.31),村落(4.01),水体(0.79)
2	丘陵,岭地,沟谷,堆积平原	林草地(17.13),丘陵旱地(77.22),村落(5.14),水体(0.51)
3	丘陵,岭地,沟谷,堆积平原	林草地(24.84),丘陵旱地(70.43),村落(4.10),水体(0.63)
4	丘陵,岭地,沟谷,堆积平原	林草地(38.60),丘陵旱地(57.87),村落(3.04),水体(0.49)
5	山地,岭地,沟谷	林草地(49.45),丘陵旱地(48.40),村落(1.98),水体(0.18)
6	山地,岭地,堆积平原,沟谷	林草地(31.24),丘陵旱地(68.76)
7	山地,沟谷	林草地(80.59),丘陵旱地(19.27),村落(0.14)

3 结果与分析

3.1 冲沟系统提取

在 ArcGIS 10.1 支持下,基于填洼 DEM 分别计算每个像元的坡度和汇水面积,构建研究区 SA 模型。结合空间分辨率为 0.6 m 的 DOM 遥感图像和现场调查,随机识别出 47 个典型冲沟沟头测点,并基于 SA 模型数据,统计分析 47 个沟头测点的 SA 值,确定出 SA 地形阈值为 45,并对 SA 模型数据进行阈值处理,即可获得区内 1 094 个冲沟沟头,经过分析和编辑最终生成沟谷线(图 1),并计算出沟长。

根据图 1 并结合野外勘察,研究区内各集水区内沟谷的数量及网络形态特征存在着较明显的差异。1,2,3,4,6 号集水区,其沟谷数量较多,沟谷分布较稀疏,较均匀,相邻级别的沟道间的流向夹角(交汇角)较小,表现为流向一致,连通性较好,有利于水土物质的搬运,在强烈降雨条件下,易发生面蚀和沟蚀。

5,7 号集水区内沟谷分布不均,第一级别沟谷密集分布于山体顶部,相邻级别沟谷间的流向夹角大,多出现直角相连,流向不一致,沟谷连通性较差,不利于水土物质的搬运。

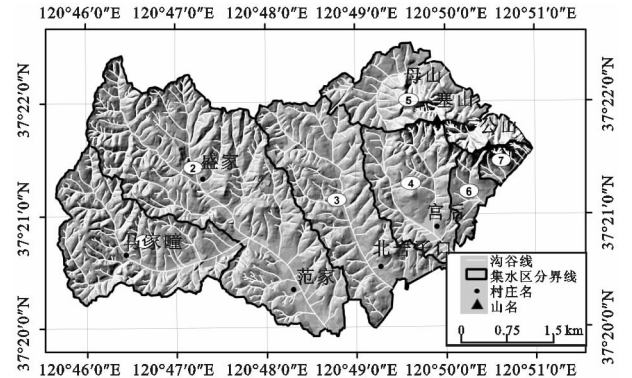


图 1 基于 SA 模型提取的冲沟系统

3.2 冲沟沟长的分形特征

为使得结果具有可比性,7 个集水区的分形无标

度区均为 2.5,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60 m。基于计盒法方法计算整个研究区及各集水区内沟长的 r 和 $N(r)$ 数对序列。分别拟合研究区及各集水区无标度区同测量盒子数量的对数关系,得到研

究区及各集水区沟长的分维值(表 2)。在上述格网边长取值范围,各集水区沟谷沟长 r 和 $N(r)$ 数回归相关系数均在 0.99 以上,表明在上述无标度区间内,各集水区沟谷具有很好的分形特征。

表 2 侵蚀沟沟长盒维数及地形参数

编号	盒维数	冲沟长度 像元数	拟合 R^2	冲沟 长度/km	沟头 数量	面积/ km ²	沟头密度/ (条·km ⁻²)	沟壑密度/ (km·km ⁻²)	平均坡度 z/x	地表 粗糙度	剖面 曲率
整区	1.0472	109660	0.9997	274.150	1094	24.0606	—	—	—	—	—
1	1.0346	19566	0.9997	48.9150	181	4.1548	43.56407	11.7731	0.230	1.0368	0.2341
2	1.0384	38635	0.9997	96.5875	330	8.7409	37.75355	11.0501	0.233	1.0377	0.2373
3	1.0278	17518	0.9997	43.7950	139	4.5667	30.43773	9.5901	0.168	1.0189	0.1696
4	1.0573	11848	0.9997	29.6200	118	2.6760	44.09567	11.0688	0.195	1.0296	0.1975
5	1.1043	17470	0.9991	43.6750	264	2.8511	92.59584	15.3187	0.303	1.0761	0.3126
6	0.9985	1993	0.9996	4.9825	15	0.6904	21.72654	7.21683	0.209	1.0340	0.2121
7	1.1476	2624	0.9980	6.5600	48	0.3710	129.3801	17.6819	0.393	1.0937	0.4146

根据分形理论,分维数的大小表征了曲线的复杂程度,即沟长的盒维数与沟谷线的规则程度关系密切。沟长盒维数小的沟谷线形态上较为顺直,沟道分叉支流少,相邻级别沟道间的走向较一致,交汇角小,形态较为顺直,没有过度的曲折。通过比较各集水区的沟谷盒维数,可以看出各区的沟谷分维分布呈现出一定的规律,且沟谷盒维数差异较大,面积小的山区集水区沟谷盒维数高于流域面积大的农耕区,沟谷分维具有明显的空间差异性。5 号和 7 号集水区沟谷盒维数高于其他区域。从地貌特点来看,5 号和 7 号集水区均为山区,其中,7 号集水区沟谷盒维数最高值,该区位于栖霞大断裂和寨里—杨础断裂小断裂边缘,北依公山地形最复杂,一级沟道数量多、分布密集、沟道交汇角接近 90°,流向差异大,因而沟道曲折度高。5 号集水区盒维数也较高,该区位于台前断裂和霞址—乔家小断裂边缘,分布于公山、母山东北坡,同样具有一级沟道数量多、密集分布、沟道交汇角接近 90°的特点。盒维数最低值为 6 号集水区,该区位于寨山南坡,地貌主要为山地及大面积的山前堆积物,土地利用类型主要有山地和农耕区,区内沟谷数量最少(15 条),沟网稀疏,一级沟道同相邻级别沟道走向接近相同,沟道顺直。1—4 号集水区盒维数差异不大,区内地貌类型为丘陵剥蚀地形和堆积内地貌类型,土地利用类型为岭地、农田、居民区及季节性小湖泊。

从沟道分形特征的动力学机制来分析,河道是外营力塑造的产物,但河道的展布却受控于内营力^[17]。沟道自相似分维值的大小可作为内外力营力作用强度和方向的重要指标。沟道分维值,不仅可能与形态有关,还可能与演化的动力(动态)学有关。5 号和 7 号集水区内构造活动强烈且较浅、大、小断层及分级断层繁多、地质构造复杂,其所发育的侵蚀沟道形态复杂,沟道汇流受地质构造控制明显,走向差异大,甚

至达 90°,因而,具有较大的分维值;反之,堆积区内的沟谷,内力作用较弱,主要体现出降雨、水流、风力、温度外力对地表的夷平塑造作用,以及人类农业生产对地表的顺势改造作用,因而,沟谷分维值较小。野外勘查各集水区,1,2,3,4,6 号集水区位于沉积凹陷区,分布有约 5 cm 厚度的褐土、河潮土,堆积作用明显,区内沟长盒维数较低(均值为 1.031 32),表明区内沟谷地貌发育主要受控于外力作用。而 5,7 号集水区,受寨里—杨础断裂和霞址—乔家扭压断裂影响明显,属于隆起区,构造活动性高于沉积凹陷区,以剥蚀作用为主,盒维数较高(均值为 1.125 95),表明区内沟谷地貌发育主要受控于内力作用。隆起区分维值明显大于沉降区,构造活动性强的山区分维值明显高于构造活动性弱的沉积凹陷区,沟谷形态特征(盒维数)同区内地质构造及构造运动状况关系密切。李锰等^[3]在 0.1~200 km 的无标度范围研究内陆地面地形等高线分形特点,指出地形等高线分形值与地貌侵蚀作用和不均匀堆积作用的强度密切相关。孔凡臣等^[7]指出,河流和沟谷长度分维值的大小反映了构造活动性的强弱,其计算的大尺度下河流和冲沟的分维值高于本文的计算值,究其原因:一是提取河流和冲沟的方法差异较大,前者剔除掉基岩沟谷,基于 1:5 万地形图目视解译出河流、沟谷网络,本研究则采用 SA 模型阈值法自动提取冲沟网络方法,研究对象包括少量基岩沟谷。SA 模型阈值法自动提取出的基岩沟谷形状较顺直,降低了冲沟沟长盒维数。二是采用的无标度区间不同,孔凡臣等^[7]以 1~16 km 为无标度区间,本文则在更小的无标度区间内开展研究,得出相似的结论。

3.3 分形特征与各因素间的相关分析

3.3.1 分形特征与地形参数的相关分析 基于 SPSS 17.0 软件,分别统计各集水区内沟长分维数同平均坡度、地表粗糙度、地面剖面曲率、沟壑密度、沟

头密度、沟长及区域面积之间的相关性(表 3)。由表 3 可看出,在 0.01 的置信水平上,平均坡度、地表粗糙度、剖面曲率、沟壑密度和沟头密度地形参数与沟长分维数间存在显著相关性,其相关性由高至低依次

表 3 分维数与地形参数的相关分析

指标	平均坡度	地表粗糙度	剖面曲率	沟壑密度	沟头密度	沟长	区域面积
皮尔逊相关性	0.8971	0.9090	0.8992	0.9753	0.9824	-0.2288	-0.3395
显著性(双侧)	0.0060	0.0050	0.0060	0.0000	0.0000	0.6216	0.4562

在上述地形参数中,沟头密度和沟壑密度与沟长盒维数间相关性超过 0.97,为极显著。表明沟壑密度和沟头密度 2 个指标均能表征集水区内冲沟分布形态特征。单位区域面积内冲沟的数量越多、沟长越长,地表表现为越破碎,沟道愈曲折复杂,分形维数越大,因而沟头密度与冲沟沟长分维数间存在密切联系,本文研究结果亦表明沟头密度、沟壑密度与沟长分维数间存在显著的线性关系。

有学者也曾定性分析过河流密度与河流长度分维数之间的关系^[5]。河流密度与河流长度分维数间的关系可由 Hack^[18]提出的主河流长度与流域面积间的幂函数关系(公式(7))来表达:

$$L=aA^m \tag{7}$$

式中: L 为主河道长度(km); A 为流域面积(km²); a , m 为经验值(无量纲)。Rotert 和 Roy 研究指出, m 取值范围介于 0.5~0.7,且随着地图比例尺增大而降低, a 取值范围介于 0.827~1.59,且随着地图比例尺增大而增大^[19]。

基于 Hack 理论,本研究中各集水区内沟谷长度 L 与区域面积 A 间的幂函数关系如下:

$$L=11.957A^{0.9554} \quad R^2=0.9307 \tag{8}$$

因为 a 取值随着地图比例尺增大而增大^[19],本文试验回归出的幂函数公式(8)中 $a=11.957$ 数值较高,原因在于公式(8)是基于 2.5 m 尺度(相当于大比例尺)回归拟合的。本文试验结果 $a(11.957)$ 和 $m(0.9554)$ 与 Rotert 和 Roy^[19] 研究结果差异较明显,原因在于本文的研究对象是冲沟沟长,而后者研究的是主河流,同一集水区内冲沟长度明显长于主河道长度,从而导致 a 和 m 偏高。本文研究结果表明,冲沟沟长与集水区面积间也存在明显的幂函数关系,但回归系数较复杂,需要后续对之深入研究。

Mandelbort^[20]认为主河道的分布具有分形特征,并认为公式(7)中系数 m 的 2 倍近似等于主河道长度分维值 D 。对公式(7)做如下变换:

$$L/A=aA^{m-1} \tag{9}$$

公式(9)左侧即为河流密度,而 m 与河长分维数有关系,因而河流密度与河长分维数间存在联系,本研究亦表明,沟壑密度与沟长分维数存在很强的线性

为:沟头密度>沟壑密度>地表粗糙度>剖面曲率>平均坡度。相对于坡度、地表粗糙度、剖面曲率、沟壑密度及沟头密度,集水区面积和沟长与沟长分维数间没有线性相关性。

相关性,具体定量分析需要后续深入研究。

3.3.2 分形特征与土地利用的相关分析 基于 SPSS 17.0 软件,分别统计各集水区内沟长分维数与土地利用面积比例之间的相关性(表 4)。可见,土地利用是外力作用,与河流分维间的关系复杂。在 0.01 置信度上,林草地比例和丘陵旱地比与沟长分维数间存在显著相关性,其相关系数分别为 0.893 1 和-0.919 8。王秀春等^[6]研究发现,随着林地比例增大,河流长度盒维数有增高趋势,而河网密度分维数却表现为降低趋势,且趋势均不明显,稳定性较差。本文研究中,集水区内沟长盒维数与区内林草地比例呈较明显的正相关性,而林草地主要分布在山地、丘陵坡顶和沟谷内等不适宜农耕区域,这些区域的地貌受人为外力影响较弱,主要受地质内力控制。丘陵旱地大多是当地农民在地质构造不复杂的山坡,通过填平作用顺地势开荒形成的,主要反映了人为的外力作用,其面积比例与沟谷分维数成较显著负相关,表明人为外力对地表的改造程度越高,冲沟展布形态越趋于简单和不自然。湖泊水体比例与沟长盒维数间没有线性相关性,表明内力和外力对湖泊水体的综合作用复杂。

表 4 分维数与土地利用类型的相关分析

指标	林草地比例	丘陵旱地比	水体比例	居民区比例
皮尔逊相关性	0.8931	-0.9198	-0.4252	-0.3638
显著性(双侧)	0.0068	0.0030	0.3416	0.4224

4 结 论

以胶东半岛丘陵区栖霞市庵里水库西岸 7 个小流域集水区为研究区,采用 SA 地形阈值模型实现定位冲沟沟头,并计算了各集水区内沟长及其盒维数,分析了沟长分维数与地形因子之间的联系,探讨了冲沟沟长分维数与地形及土地利用类型间的相关性。结果表明:

(1) 研究区各集水区沟谷平均分维值为 1.047 2,研究区内东部构造活动性强的隆起区分维值明显高于西部构造活动性弱的沉积凹陷沉降区,表明沟谷地貌发育及分形特征主要地受质构造控制。

(2) 平均坡度、地表粗糙度、剖面曲率、沟壑密度和沟头密度地形参数与沟长分维数间存在显著相关性,其相关性由高至低依次为:沟头密度>沟壑密度

＞地表粗糙度＞剖面曲率＞平均坡度。集水区面积和沟长与沟长分维数间没有线性相关性。

(3) 沟头密度和沟壑密度与沟长分维数之间存在着极显著线性关系,是表达沟谷分形特征的重要参数,可作为估算区域沟谷分形特征和分形维数的简单指标。

(4) 沟长分维数与林草地比例存在较显著的正相关,与丘陵旱地面积比例存在较显著的负相关,表明冲沟展布形态特征与大的地貌轮廓关系密切,与人类改造地表形成的微地貌关系不大。

参考文献:

[1] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. Catena, 2003, 50: 91-133.

[2] 何福红,王涛,范擎宇,等. 地形和遥感图像融合技术在冲沟参数提取中的应用:以栖霞市庵里水库东缘流域为例[J]. 地理研究, 2015, 34(11): 2124-2132.

[3] 李锰,朱令人. 地形等高线的分形特征及其动力学含义[J]. 西北地震学报, 2002, 24(2): 97-103.

[4] 何福红,李勇,张晴雯,等. 基于 GPS 不同测量间距的 DEM 地形信息提取沟蚀参数对比[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 116-120.

[5] 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.

[6] 王秀春,吴姗,毕晓丽,等. 泾河流域水系分维特征及其生态意义[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(3): 364-368.

[7] 孔凡臣,丁国瑜. 山西及邻区水系与黄土冲沟的分形几何学分析结果及其与构造活动的关系[J]. 地震地质, 1991, 13(3): 221-229.

[8] 王小丹,范建容,柴宗新,等. 金沙江下游元谋盆地冲沟沟头弯曲度的分形研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(10): 65-67.

(上接第 245 页)

[11] 许明祥,刘国彬,卜崇峰,等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 54-58.

[12] Liu Y, Fu B J, Lu Y H, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2012, 138(1): 404-414.

[13] 刘道平,陈三雄,张金池,等. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 493-498.

[14] 刘艇,王继红. 不同植被覆盖土壤水库容特征及渗透速率[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(4): 471-475.

[15] 魏胜利. 田间持水量的测定与旱情分析[J]. 水科学与工程, 2005(增刊): 53-54.

[16] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中

[9] 崔灵周,李占斌,郭彦彪,等. 基于分形信息维数的流域地貌形态与侵蚀产沙关系[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 197-203.

[10] 李精忠,刘剑炜,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.

[11] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion[J]. Catena, 1999, 37: 393-399.

[12] Zhang Y G, Wu Y Q, Liu B Y, et al. Characteristics and factors controlling the development of ephemeral gullies in cultivated catchments of black soil region, Northeast China[J]. Soil Tillage Research, 2007, 96: 28-41.

[13] 耿瑞. 山东省栖霞市山城金矿床地质特征及成因研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.

[14] Moore I D, Burch G J, Mackenzie D H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies[J]. Transactions of the ASE, 1988, 31(4): 1098-1107.

[15] Daggupati P, Sheshukov A Y, Douglas-Mankin K R. Evaluating ephemeral gullies with a process-based topographic index model[J]. Catena, 2014, 113(2): 177-186.

[16] 范建容,刘淑珍,周从斌,等. 元谋盆地土地利用/土地覆盖对冲沟侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 130-132.

[17] 艾南山,朱治军,李后强. 外营力地貌作用随机特性和分形布朗地貌的稳定性[J]. 地理研究, 1998, 17(1): 24-31.

[18] Hack J T. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland[J]. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center, 1957, 294(1): 208-209.

[19] Rotert A, Roy A. On the fraetal interpretation of the mainstream, length dralnage area relationship[J]. Water Resoures Research, 1990, 26: 839-842.

[20] Mandelbrot B B. The fraetal geometry of nature[M]. New yorlk: W. H. Freeman and Company, 1982.

国农学通报, 2008, 24(7): 494-499.

[17] 刘建伟,史东梅,马晓刚,等. 弃渣场边坡稳定性特征分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 192-196.

[18] 高鹏,穆兴民,刘普灵,等. 降雨强度对黄土区不同土地利用类型入渗影响的试验研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 1-6.

[19] 柴亚凡,王恩,陈详伟,等. 植被恢复模式对黑土贮水性能及水分入渗特征影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 60-64.

[20] 刘尧让,于法展,李淑芬,等. 苏北山丘区森林群落次生演替中土壤物理性质及其持水性能研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 135-140.

[21] 李洪兵,赵西宁,王娟,等. 生草和树枝覆盖对果园土壤持水性能的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 136-142.