

胶东半岛丘陵区冲沟沟长曲折度分形研究

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: 冲沟沟长的分维数和分形曲折度是表征沟道形态复杂程度的重要指标。以栖霞市庵里水库西缘流域为研究区, 基于 SA 地形指标模型阈值法提取冲沟系统, 测算冲沟沟长盒维数, 研究地形参数同冲沟沟长分维和沟长分形曲折度间的相关性, 并建立模型模拟沟长分维数及分形曲折度, 并对模型进行检验。结果表明: (1) 流域内沟长分维数和曲折度同平均坡度、地表粗糙度、剖面曲率和沟壑密度具有极显著的线性关系, 沟长分维数和沟长分形曲折度可以作为评价区域地形形态特征的综合指标。(2) 建立了沟长分维数和曲折度单因子模拟模型, 其中沟壑密度单因子模型, 模拟沟长分维数和分形曲折度的相对误差分别为 0.007 8% 和 0.025 2%, 精度高, 可用于冲沟沟长分维数和曲折度的快速估算; 坡度、剖面曲率、地表粗糙度构建的单因子模型模拟精度相对较低。

关键词: 沟谷; SA 模型; 盒维数; 分形曲折度; 回归分析

中图分类号: K909

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0027-05

Study of the Fractal Curvature of Gully Length in the Jiaodong Peninsula

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

(1. College of Resources and Environment Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China; 2. Institute of Systems Science and Mathematics, NAAU, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: The fractal dimension (FD) and fractal curvature (FC) of gully length are the indicators of the shape complexity of a gully. The west watershed of the Anli Reservoir in the Jiaodong Peninsula was selected as the study area, the gully heads were located, and the gully lengths were derived using the slope area index (SA) model. The FDs of the study area were calculated by the box counting method. The relationship between the FDs and the topographic parameters was analyzed, and the single-factor models were constructed to estimate the FD and FC of gully length, which were tested in an examined watershed. The results showed that: (1) the ravine density, surface roughness, profile curvature, and terrain average gradient were found to have significant positive correlation with the FDs of gully length in the study watersheds, and the FD and FC of gully length were two comprehensive indicators of topographic morphology; (2) among the single-factor models for estimating FD and FC, the models with the ravine density single factor can be used to quickly estimate the fractal dimension and fractal curvature of gully length with higher accuracy, and the relative errors of gully length fractal dimension and fractal curvature are 0.007 8% and 0.025 2%, respectively. The models with other single factors, such as slope, plan curvature and surface roughness, are not suitable for estimating the fractal dimension and fractal curvature of gully length, and they have low accuracy.

Keywords: gully; slope area index (SA) model; box dimension; fractal curvature; regression analysis

近年来,分形理论在水系和海岸岸线等典型水蚀地貌的研究中得到广泛的应用^[1-5],部分学者也曾将分形理论引入到沟头形状、沟道微地貌及基于汇水量不同阈值下沟谷分形特征的研究^[6-10]。借鉴河流曲

折度和岩溶洞穴的分形弯曲度的概念^[5,11-12],沟长曲折度被定义为沟谷上两点间的直线距离同其曲线距离间的比值。从分形理论的角度来看,沟长弯曲度是分形无标度区的上、下限测量所得到的沟头长度之

比^[6]。沟长分形曲折度是沟谷地貌在一定地质构造(内力)和自然环境(外力)作用下,由坡面细沟、冲沟及季节性河道相互贯通、袭夺、合并和分叉而表现出特定的地貌形态的表现^[11]。沟长弯曲度是同沟长分形维数相关的一个综合表征沟谷弯曲形态特征的量度。王小丹等采用实测方法测算了沟头曲线分维值和沟头分形弯曲度 P_r ,并将 P_r 作为沟蚀发育快和慢的指标,尝试研究了沟谷分形同沟蚀发育过程间的联系^[6]。基于分形理论,Wang 等分析了不同土地利用方式下沟头溯源侵蚀速率及空间形态特征,并指出流域内沟头分维数和弯曲度可作为估价沟谷形态及发育阶段的指标^[7]。

以往学者从沟谷分形特征的角度探讨了沟蚀发育阶段、地质构造同自然环境外力间的关系,并将沟长(沟头)分维数和分形曲折度综合评价沟谷地貌形态特征^[6-10],丰富了沟蚀的研究内容。但测算沟长分维数和分形曲折度的方法较为繁琐和费时。基于此,本文以胶东半岛丘陵区栖霞市庵里水库西岸 8 个集水区为研究区,采用 SA 地形阈值模型定位冲沟沟头并测算沟长,基于盒维法测算各集水区沟长分维数。基于回归分析法,定量分析地形因子同沟长分维数和沟长曲折度之间的相关性,并构建模型模拟沟长分维数和分形曲折度,丰富地貌形态学和沟蚀的研究内容。

表 1 集水区基本信息

集水区	位置	地貌类型	主要土地利用类型
1	位于 2 号小流域西北支流	丘陵,岭地,沟谷,堆积平原	林草地,丘陵旱地,村落,水体
2	位于盛家村—范家村小流域	丘陵,岭地,沟谷,堆积平原	林草地、丘陵旱地、村落、水体
3	位于北岩子口村小流域	丘陵,岭地,沟谷,堆积平原	林草地、丘陵旱地、村落、水体
4	位于宫后村	丘陵,岭地,沟谷,堆积平原	林草地、丘陵旱地、村落、水体
5	位于母山和寨山北侧	山地,岭地,沟谷	林草地、丘陵旱地、村落、水体
6	位于公山西南侧	山地,岭地,堆积平原,沟谷	林草地、丘陵旱地
7	位于公山南侧	山地,沟谷	林草地、丘陵旱地、村落
8	位于水库东岸黑山东侧小流域	山地,岭地,堆积平原	林草地、丘陵旱地

2 研究方法

2.1 沟头提取方法

沟头是沟蚀地貌中发育最活跃的部位^[14-15],沟头的溯源侵蚀是一种地形、自然等多因子临界现象^[15-20],只有在径流产生的剪切力大于土壤的抗蚀力时沟头侵蚀才会启动。地形临界模型能够较科学的预测冲沟沟头甚至沟长,被广泛应用于沟蚀的研究^[16-20]。SA (slope area index) 地形指标模型是预测冲沟沟头的最简单、快捷、有效的地形临界模型^[18-19]。

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

式中: t 为地形指标模型值(m); S 为地形坡度(m/m);

1 研究区概况与数据源

研究区由 7 个试验集水区和 1 个验证集水区组成,位于山东省栖霞市庵里水库西缘,经纬度范围为 $37^{\circ}20'30''$ — $37^{\circ}22'30''$ N, $120^{\circ}48'$ — $120^{\circ}51'$ E,流域面积 24.061 km^2 (不包括验证集水区),平均海拔约 175 m。研究区内气候属温带季风型湿润气候,年平均温度 11.3°C ,年平均降雨量 770 mm 左右,年际变化较大,降雨多集中于夏季,且多暴雨。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。各流域内土壤呈现垂直分布性: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。流域北缘受台前断裂和寨里—杨础断裂控制,南缘受栖霞断裂和霞址—乔家断裂控制^[13]。流域内河流主要为暂时性河床水流,沟底为冲积平原,分布有村落及农田。试验集水区和验证区内河流汇流于庵里水库(表 1),同当地的农业生产和人们的生活息息相关。

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 数据。

A 为汇水面积(m^2/m)。当 t 的值超过某一临界阈值时地表径流下切才会形成冲沟沟头。不同流域内冲沟的发育环境和条件不同,沟头发育位置的 SA 阈值不同,其变化范围大致在 $5 \sim 50$ ^[18-19]。

2.2 沟长分维值的计算

计盒法是分形维数计算常用的方法之一。对于给定标度为 r 的正方形网格去量测冲沟沟谷线,将得到冲沟沟谷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。当 $r \rightarrow 0$ 时,即可由式(2)得到分维数^[1-5]:

$$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln r} \quad (2)$$

式中: r 为正方形网格的边长; $N(r)$ 为以 r 边长网格量测冲沟沟谷线所需要的网格数目。在实际应用中, 标度 r 不可能为 0, 且只能取有限值。因而, 式(2)便成为由一系列标度 r 和与之对应的盒子数 $N(r)$ 的自然对数所构成的离散的数对 $[\ln r, \ln N(r)]$, 可用最小二乘法拟合出一条直线:

$$\ln N(r) = -D \ln r + A \quad (3)$$

式中: A 为待定常数; D 即为分维数。

2.3 地形参数的计算

地形坡度是描述地貌表面形态的基本参数之一, 反映了地面区域内地表高程的变化率, 可用 ENVI 4.8 的 Topo Modeling 模块中的 slope 工具计算 DEM 数据中每个像素的坡度。

地表粗糙度是表征地表地形起伏程度的基本参数, 常用地表单元的曲面面积与其水平投影面积之比来计算(式 4)。地形起伏较大, 其地表粗糙度值较大, 反之依然。

$$\omega = 1 / \cos(\theta) \quad (4)$$

式中: ω 为地表粗糙度; 取值 $[1, \infty)$; θ 为坡度(rad)。

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。因为, 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, 本研究则采用无标度区的测量上限 r_s 下测算出的冲沟长度(L_s)来计算沟壑密度(式 5)。

$$\rho = L_s / S \quad (5)$$

式中: ρ 为沟壑密度(km/km^2); S 为流域面积(km^2)。

借鉴河流曲折度和岩溶洞穴的分形弯曲度的概念^[5, 11-12], 将沟长曲折度定义为所测沟谷的直线长度与真实曲线长度之比, 曲折程度越大, 偏离直线越远。根据分形理论, 在分形无标度区间内, 无法获得沟长的真实曲线长度。因而, 可以采用分形无标度区的上、下限测量所得到的沟头长度分别近似沟谷直线长度和曲线长度。结合式(3), 将分形曲折度定义为:

$$\begin{aligned} P_t &= L_x / L_s = N(r_x) r_x / N(r_s) r_s \\ &= r_x^{1-D} e^A / r_s^{1-D} e^A = (r_x / r_s)^{1-D} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: r_x 和 r_s 分别为无标度区的测量上限和下限; L_x 和 L_s 分别为用 r_x 和 r_s 量测到的冲沟总长度。

2.4 模型构建及检验

基于 7 个试验集水区内的沟长分维值, 采用回归分析方法分别分析沟长分维数和分形曲折度同平均坡度、平均地表粗糙度、沟壑密度之间的联系, 并建立与之对应的单因子模型模拟集水区沟长分形维数和分形曲折度。选择庵里水库流域内研究区(7 个集水

区)相临的一小流域(8 号集水区)作为检验区, 采用构建的模型对检验区内沟长的分维数和分形曲折度进行模拟, 并采用模拟值同测算值间的绝对误差和相对误差对模型精度进行验证。相对误差由下式计算:

$$\alpha = \Delta T / T \quad (7)$$

式中: T 为实际测算值, ΔT 为模拟值同 T 差值的绝对值。

根据式(6), 对于相同的无标度区间, 曲折度同分形维数间存在对应关系, 因而, 曲折度模拟值同测算值间的绝对误差 ΔP_t 和相对误差 α 可以简化为式(8), (9):

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= |p_t - P_t| = |(r_x / r_s)^{(1-d)} - (r_x / r_s)^{(1-D)}| \\ &= |(r_x / r_s)[(r_x / r_s)^{-d} - (r_x / r_s)^{-D}]| \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_t / P_t &= |[(r_x / r_s)^{-d} - (r_x / r_s)^{-D}]| / (r_x / r_s)^{-D} \\ &= |[(r_x / r_s)^{-d} - (r_x / r_s)^{-D}]| \times (r_x / r_s)^D \end{aligned} \quad (9)$$

式中: p_t 和 d 分别沟长分形曲折度和分维值的模拟值; P_t 和 D 分别为沟长分形曲折度和分维值的实际测算值, 其他参数说明同上。

3 结果与分析

3.1 沟谷网络提取

利用 ArcGIS 10.1 软件的 Hydrology 工具包填注 DEM 数据, 得到无洼地 DEM, 再计算每个像元的汇水量。基于 ENVI 4.8 的 Topo Modeling 模块中的 slope(percent)工具, 对填注后的 DEM, 以 13×13 的窗口, 依次计算 DEM 中所有像素的坡度。根据式(1), 构建研究区流域 SA 模型。结合空间分辨率为 0.6 m 的 DOM 遥感图像和野外现场调查随机识别出 47 个典型冲沟沟头测点, 统计出沟头测点的 SA 地形阈值为 45, 并对 SA 模型数据进行阈值处理, 共获得区内 1 094 个冲沟沟头, 最后对阈值结果数据进行空间编辑和分析生成沟谷线(图 1), 并计算出沟长。计算坡度时, 窗口大小的选择对计算的坡度值、定位冲沟沟头的临界 SA 值及沟谷线的连贯性存在影响, 窗口尺寸太小, 微地形差异信息突出, 沟头坡度偏大, SA 阈值偏高, 定位沟头位置精度较高, 但地形综合性和趋势性较差, 因而, 形成的沟谷线连贯较差。试验中, 综合考虑定位沟头的精度和沟谷线的连贯性, 采用的窗口尺寸是 13 像素 \times 13 像素。

3.2 沟长的分维数及曲折度

考虑结果的可比性, 7 个试验集水区和 1 个验证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了整个研究区及各流域内沟长的 r 和 $N(r)$ 数对序列。

分别拟合研究区及各子流域无标度区同测量盒子数量的对数关系,得到各集水区内沟长的分维值(表 2)。各集水区 $\ln N(r)$, $\ln r$ 数对序列线性回归相关系数都在 0.99 以上,说明格网边长取值范围(实际距离 2.5~60 m)能很好地作为该分维的无标度区间。由各集水区内沟长的分维值,代入式(6)求得各流域内沟长曲折度(表 2)。

3.3 模型构建

分别统计出各试验集水区内平均坡度、平均地表粗糙度及平均地面剖面曲率,并同其沟长分维数建立回归模型(表 3)。由拟合结果所示,流域内沟长分维数同流域内平均坡度、平均地表粗糙度及平均地面剖

面曲率间存在明显的线性相关,因而沟长分维数可以作为衡量河流沟谷地貌形态特征的综合指标。由建立的沟长分维数回归模型,代入到式(6)构建各集水区内沟长曲折度模拟模型(表 3)。

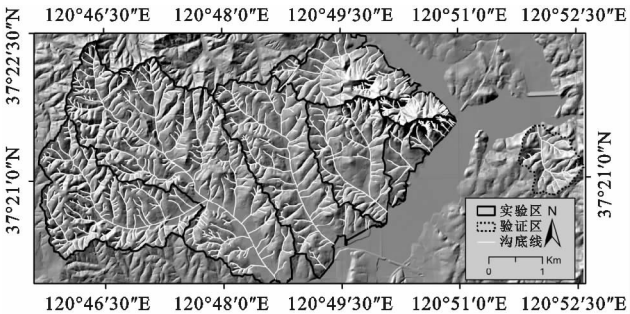


图 1 基于 SA 模型提取的冲沟系统

表 2 栖霞庵里水库西岸 7 个集水区侵蚀沟沟头分维数及地形参数

集水区	分维数	沟长曲折度	沟壑密度/(km·km ⁻²)	地表粗糙度	剖面曲率	平均坡度/rad
1	1.0346	1.1162	11.7731	1.0368	0.2341	0.230
2	1.0384	1.1298	11.0501	1.0377	0.2373	0.233
3	1.0278	1.0924	9.5901	1.0189	0.1696	0.168
4	1.0573	1.1997	11.0688	1.0296	0.1975	0.195
5	1.1043	1.3930	15.3187	1.0761	0.3126	0.303
6	0.9985	0.9952	7.21683	1.0340	0.2121	0.209
7	1.1476	1.5985	17.6819	1.0937	0.4146	0.393

表 3 冲沟沟长分形与曲折度模拟模型

编号	自变量	冲沟沟长分形模拟模型		冲沟曲折度模拟模型
(1)	平均坡度	$y=0.5953x+0.9111$	$R^2=0.80$	$y=0.0417^{(-0.5953x+0.0889)}$
(2)	平均地表粗糙度	$y=1.6941x-0.7148$	$R^2=0.83$	$y=0.0417^{(-1.6941x+1.7148)}$
(3)	平均剖面曲率	$y=0.5474x+0.9193$	$R^2=0.81$	$y=0.0417^{(-0.5474x+0.0807)}$
(4)	沟壑密度	$y=0.0142x+0.8891$	$R^2=0.95$	$y=0.0417^{(-0.0142x+0.1109)}$

由表 3 可见,各回归拟合模型中,沟壑密度单因子回归模型(4)的 R^2 参数明显高于其他三个模型(1—3)。沟壑密度是表征区域沟道切割疏密程度的指标。沟壑密度大反映地表沟谷发育较好,地面被径流的切割程度大,地形复杂,地势较陡峭,土壤的透水性相对差,易被流水侵蚀;沟壑密度小则说明地表径流发育差,地表坡度小,土壤透水性能好,水系长而

疏,少有细小支流。

3.4 模型检验

采用盒维法测算出验证区沟长的分维数为 1.015 7,并计算出验证区的平均坡度、平均地表粗糙度、平均剖面曲率及沟壑密度。基于 3.3 所建立的分维数模拟模型,分别估算出验证区沟长分维数和分形曲折度,并对误差进行分析(表 4)。

表 4 各模拟模型精度分析

编号	自变量	变量值	模拟值		绝对误差		相对误差/%	
			盒维数	曲折度	盒维数	曲折度	盒维数	曲折度
1	平均坡度	0.2433	1.0559	1.1945	0.0402	0.1434	3.9614	13.6410
2	平均地表粗糙度	1.0292	1.0287	1.0957	0.0130	0.0446	1.2866	4.2404
3	平均剖面曲率	0.5639	1.2279	2.0638	0.2123	1.0126	20.8998	96.3314
4	沟壑密度	8.9099	1.0156	1.0509	7.942 E-05	0.0003	0.0078	0.0252

注:实测检验区沟长分维数和曲折度分别为:1.015 7,1.051 2。

由表 4 可见,各模型估算分维数值和分形曲折度的相对误差差异较明显。由地形坡度、地表粗糙度及平面曲率构建的单因子模型模拟分维数和分形曲折

度明显高于实测值,而沟壑密度构建的单因子模型模拟分维数和分形曲折度最接近实测值。

定量分析模拟值同实测值间的分维值相对误差

和分形曲折度相对误差两个指标发现,模型(4)模拟分维数和分形曲折度的相对误差分别为:0.007 8, 0.025 2,准确性明显高于其他模型。

由上分析可见,沟长分维数和分维曲折度同沟壑密度间存在显著相关性,所构建的模型(4)估算出的分维数和沟长曲折度其相对误差都是最低的,且只需要一个参数,可作为模拟流域内沟长分维数和沟长分形曲折度最简单的线性模型。

4 结论

(1)利用回归分析法,对流域沟长分维数和沟长分形曲折度同平均坡度、平均地表粗糙度、平面曲率及沟壑密度进行相关分析。沟长分维数同平均坡度、平均地表粗糙度、平面曲率及沟壑密度存在着明显线性关系,可用来综合表征河流沟谷地貌形态特征。

(2)基于统计回归方法,以平均坡度、平均地表粗糙度、平面曲率及沟壑密度为自变量,建立模型模拟集水区内沟长分维数和沟长分形曲折度。随机选择庵里水库流域内一子流域对各模型的模拟精度进行检验,结果表明:沟长分维数和分形曲折度同沟壑密度间的线性模型具有参数少,模拟精度高的优点,可被用于快速估算冲沟沟长分维数及沟长曲折度;沟长分维数及曲折度同平均坡度、平面曲率、沟壑密度盒间的单因子线性模型模拟精度较低。本文的研究结果为估算流域沟长分形维数和分形曲折度提供了简捷估算的方法,丰富了沟谷地貌形态和沟蚀的研究内容。

参考文献:

- [1] Mandelbrot B B. The fraetal geometry of nature[M]. New York:W. H. Freeman and Company, 1982.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王小丹,范建容,柴宗新,等. 金沙江下游元谋盆地冲沟头弯曲度的分形研究[J]. 水土保持学报,2001,15(10):65-67.
- [7] Wang X D, Zhong X H, Liu S Z, et al. A non-linear technique based on fractal method for describing gully-head changes associated with land-use in an arid environment in China[J]. Catena, 2008,72(1):106-112.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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] 沈玉昌,龚国元. 河流地貌学概论[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [12] 李文兴. 岩溶洞穴的分形弯曲度[J]. 中国岩溶,1995,14(3):241-245.
- [13] 王佳良,孙丰月,王力,等. 山东栖霞马家窑金矿床地质特征及成因探讨[J]. 黄金,2013(6):14-20.
- [14] 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.
- [15] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. Catena, 2003,50(2):91-133.
- [16] 何福红. 基于“3S”技术的沟蚀研究方法构建与应用[D]. 北京:中国农业科学院,2006.
- [17] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion[J]. Catena, 1999,37(3):393-399.
- [18] 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 ASEA,1988,31(4):1098-1107.
- [19] 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.
- [20] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨[J]. 地理科学,2006,26(4):449-454.