

# 东北漫川漫岗区侵蚀沟发育特征研究

顾广贺<sup>1</sup>, 王岩松<sup>2</sup>, 钟云飞<sup>2</sup>, 刘建祥<sup>2</sup>, 范昊明<sup>1</sup>, 刘立权<sup>3</sup>

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866; 2. 松辽水利委员会, 长春 130000; 3. 辽宁省水土保持局, 沈阳 110003)

**摘 要:** 东北漫川漫岗区位于黑土区核心位置, 侵蚀沟发育严重。利用 3S 获取侵蚀沟数量、长度等数据, 计算降雨侵蚀力、坡度、坡长, 分析侵蚀沟发育特征及三因素对侵蚀沟发育影响。结果表明: 东北漫川漫岗区 75.11% 的发展沟处于发育初、中期, 潜在发育危险性较大, 沟蚀剧烈程度地域性差异显著, 研究区南、北部沟壑密度分别为 0.3、0.06 km/km<sup>2</sup>; 地形、冻融历时、温差等差异造成降雨侵蚀力对北部侵蚀沟发育影响显著, 南部相对较弱; 研究区坡度与坡长呈正相关关系, 北部坡缓造成坡度与沟壑密度呈线性增加关系, 南部坡陡造成坡度与沟壑密度呈线性减小关系, 北部、南部地形因子与沟壑密度分别呈线性增加、减小关系, 随着坡长的增加, 沟壑密度先增加后减小, 临界坡长为 900 m。

**关键词:** 东北漫川漫岗区; 侵蚀沟; 影响因素; 发育特征

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)02-0047-05

## Development Characteristics of Gullies in Rolling Hilly Regions in Northeast of China

GU Guanghe<sup>1</sup>, WANG Yansong<sup>2</sup>, ZHONG Yunfei<sup>2</sup>, LIU Jianxiang<sup>2</sup>, FAN Haoming<sup>1</sup>, LIU Liquan<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Songliao Water Resources Commission, Changchun 130000, China; 3. Liaoning Bureau of Soil and Water Conservation, Shenyang 110003, China)

**Abstract:** Rolling hilly region in northeast of China is located in the center of the black soil area where gullies are ubiquitous. We examined gully development characteristics and factors affecting its development by 3S technology, computing rainfall erosivity, slope gradient and slope length. The results show that 75.11 percent of gullies in this area are at early or middle development stage and they have great developmental potential dangers. The intensity of erosion gully development in the study area has significant regional differences, the gully densities in the south and north of study area are 0.3, 0.06 km/km<sup>2</sup>, respectively. The differences of terrain, freezing-thaw duration and temperature are the main reasons that caused rainfall erosivity, which has significant impacts on gully development in the northern, less impacts on gully development in the southern. Slope gradient and slope length have positive correlations in the study area, slope in the northern area is small and it has positive correlations with gully density, slope in the southern area is big and it has negative correlations with gully density, topographic factors in the northern and southern areas have positive and negative correlations with gully densities, respectively; with the growth of slope length, the gully density increases firstly and then decreases, the critical slope length is 900 m.

**Keywords:** rolling hilly regions in northeast of China; gully; factors; development characteristics

侵蚀沟是地表径流在坡度或高程发生变化而又缺乏植物保护的裂点汇集进而形成的, 在水土流失中占有重要地位, 对土地资源破坏严重<sup>[1]</sup>, 加剧了水土流失过程, 吞噬土地<sup>[2]</sup>, 使得土地破碎, 制约农业机械化生产, 造成粮食减产, 交通不便<sup>[3]</sup>。国外对侵蚀沟的研究起步较早, 我国对于侵蚀沟的研究起源于黄土高原, 东北黑土区侵蚀沟研究相对较少。已有的研究成果中室内模拟试验较多, 多研究细沟发育规律<sup>[4-6]</sup>, 也有运用三维激光扫描仪、GPS 等测量仪器野外实

测侵蚀沟<sup>[7-9]</sup>。随着遥感及 GIS 技术的日渐成熟, 有学者利用此项技术研究侵蚀沟发育及分布特征, 这也解决了侵蚀沟研究空间尺度的问题, Vrieling 等<sup>[10]</sup>使用多光谱 QuickBird 影像和实地调查数据验证了 ASTER 影像提取切沟的可行性, J. A. Marti' nez-Casasnovas<sup>[11]</sup>利用 GIS 技术研究西班牙东北部侵蚀沟溯源侵蚀速率及其引发的侵蚀量, 闫业超等<sup>[12]</sup>基于遥感和 GIS 技术提取黑龙江克拜地区侵蚀沟密度, 分析其动态变化及高程、坡度分异特征, 越来越多

的研究表明 3S 技术可以快速、准确地解译大空间尺度侵蚀沟分布情况。

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地,由于人为活动的加剧,黑土区水土流失严重,沟蚀现象十分突出<sup>[13]</sup>。全国第一次水利普查结果显示黑土区共有侵蚀沟 295 663 条,沟壑密度为 0.27 km/km<sup>2</sup>,88.67%的侵蚀沟为发展沟,侵蚀沟发育潜在危险性极大<sup>[14]</sup>。黑土区共有 7 个二级水土保持规划分区,东北漫川漫岗区为其中之一,位于黑土区中部,耕地较多,坡长、坡缓等特点造成该区域是黑土区侵蚀沟高发区,侵蚀沟的发展已经严重破坏黑土资源,威胁国家粮食安全,影响当地居民的生活。侵蚀沟是降雨、土壤、地形等因素综合作用的结果,确定各因素与侵蚀沟发育的关系对于侵蚀沟防治十分重要。降雨是东北地区侵蚀沟发育主要动力因素,坡度是侵蚀沟发育的主要诱因,坡长在很大程度上影响集水区面积、沟道内蚀积、径流状态进而影响侵蚀沟发育。研究按照位置均匀分布原则选取东北漫川漫岗区内 7 个典型市县,利用 3S 技术提取侵蚀沟长度、面积等指标,分析侵蚀沟发育特征及降雨侵蚀力、坡度、坡长对侵蚀沟发育影响,探讨侵蚀沟发育规律,研究成果将为黑土区侵蚀沟治理提供一定依据。

## 1 研究区概况

东北漫川漫岗区位于黑土区中部,主要是指大小兴安岭和长白山延伸的山前台地,由“德北山前台地”、“克拜波状起伏台地沟壑”和“南部波状缓倾斜台地”三部分共同组成,总面积达 11.41 万 km<sup>2</sup>。漫川漫岗区地势波状起伏,土地利用以耕地为主,水土流失类型以水力侵蚀为主,春季解冻期冻融、融雪侵蚀剧烈。

东北漫川漫岗区地形比较复杂,起伏较大,坡长多为 500~1 000 m,气候属于寒温带大陆性半湿润气候<sup>[15]</sup>,春季多风,气温寒暑相差悬殊,气温平均为 0℃,平均日照时数 2 740 h,无霜期 110~120 d。年总降水量 500~550 mm,年平均降水自西南向东北递增,降雨年际变化大,分布不均,7—9 月降水占全年降水的 70%<sup>[16]</sup>。土壤主要由黑土、黑钙土和草甸土组成<sup>[17]</sup>。漫川漫岗区汇水面积较大,土壤团粒结构差,因此面蚀严重。一旦遇到大雨或暴雨时,常发生沟蚀,沟壑冲刷严重。

## 2 材料与方法

选取东北漫川漫岗区内 7 个典型县区为研究对象,分别为双城、农安、嫩江、昌图、庆安、克山、海伦,各县区具体位置见图 1。以第一次水利普查东北黑

土区侵蚀沟普查数据为基础,提取研究区侵蚀沟长度、面积等数据,侵蚀沟沟缘线、沟底线勾绘偏差不超过 2 个像元即 5 m,每县抽取 10 条侵蚀沟进行野外实地核查,确保侵蚀沟长度误差不超过 5%,起讫经纬度误差不超过 1"。侵蚀沟解译方法为:以 2.5 m 分辨率的遥感影像和 1:5 万 DEM 为数据源,利用 ERDAS 等软件对遥感影像进行波段组合,生成不同的假彩色融合图像,对生成的结果图进行效果对比,选用最有利于目标解译的合成图。应用 GIS 软件,采取人机交互方式解译侵蚀沟长度、面积、类型等指标,通过影像预判和实地复核建立解译标志,确保侵蚀沟全部识别,通过野外核查对侵蚀沟解译成果进行修正,提取的侵蚀沟长度介于 100~5 000 m,面积介于 0~5 000 hm<sup>2</sup>,侵蚀沟发育类型包括切沟、冲沟,利用 ArcGIS 软件空间分析功能,基于研究区 DEM 提取坡度、坡长,坡度提取利用 ArcGIS 的坡度算法,坡长提取利用区域土壤侵蚀因子提取工具 LS\_Tool<sup>[18-19]</sup>。通过国家气象局官方网站下载研究区 1952—2013 年日值降雨数据,选用章文波提出的模型计算多年平均降雨侵蚀力,模型如下:

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^k D_j^\beta \quad (1)$$

式中: $M_i$ ——第  $i$  个半月时段的降雨侵蚀力[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]; $D_j$ ——半月时段内第  $j$  天的侵蚀性日降雨量(mm),根据谢云等<sup>[20]</sup>的研究,以日降雨量 ≥12 mm 作为侵蚀性降雨量的标准; $k$ ——该半月时段内的时间(d),半月时段的划分以每月第 15 日为界,将全年划为 24 个半月时段; $\alpha, \beta$ ——模型待定参数。

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + 18.144P_{d12}^{-1} + 24.455P_{y12}^{-1} \quad (3)$$

式中: $P_{d12}$ ——日雨量 12 mm 以上(包括等于 12 mm)的日平均雨量(mm); $P_{y12}$ ——日雨量 12 mm 以上(包括等于 12 mm)的年平均雨量(mm)。

## 3 结论与分析

### 3.1 东北漫川漫岗区侵蚀沟发育特征

研究区共有侵蚀沟 14 273 条,其中 88.91%为发展沟,11.09%为稳定沟,侵蚀沟总长度为 557.66 km,总面积为 13 415.04 m<sup>2</sup>。由图 2 可以看出,研究区沟壑密度介于 0.01~0.47 km/km<sup>2</sup>,分布密度介于 0.05~0.91 条/km<sup>2</sup>,沟壑密度、分布密度均值分别为 0.2 km/km<sup>2</sup>,0.42 条/km<sup>2</sup>。沟壑密度与分布密度成正相关关系,关系式为  $y = 1.87x + 0.06$ ,相关系数  $R^2 = 0.97$ ,这说明单位面积内侵蚀沟数量与长度成正相关关系,侵蚀沟发育规模接近。庆安、克东、

海伦沟壑密度、分布密度较大,双城、农安、嫩江、昌图沟壑密度、分布密度较小,两项指标标准差分别为 0.18,0.35。这说明东北漫川漫岗区侵蚀沟发育剧烈程度具有地域性差异,结合研究区所处地理位置(图 1)可以看出,东北漫川漫岗区北部侵蚀沟发育严重,沟壑密度、分布密度分别为 0.3 km/km<sup>2</sup>,0.61 条/km<sup>2</sup>,南部侵蚀沟发育相对较弱,沟壑密度、分布密度分别为 0.06 km/km<sup>2</sup>,0.18 条/km<sup>2</sup>。

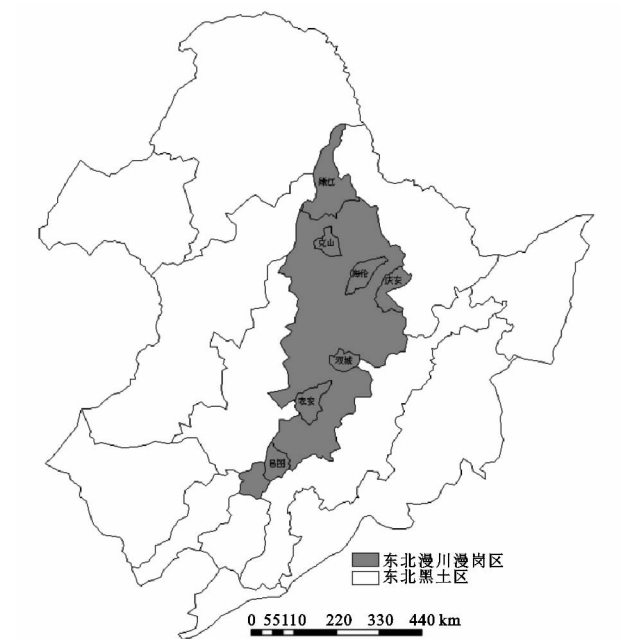


图 1 研究区地理位置

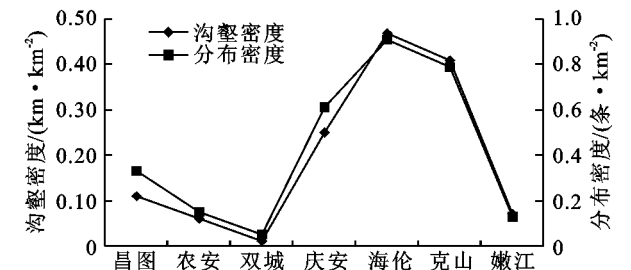


图 2 研究区沟壑密度与分布密度

根据黑土区侵蚀沟长度分布特征,将发展沟长度分成 5 个范围,分别为 100~200,200~500,500~1 000,1 000~2 500,2 500~5 000 m。由图 3 可以看出,随着长度的增加,侵蚀沟数量先增加后减小,41.26%的侵蚀沟处于 200~500 m,33.85%的侵蚀沟处于 500~1 000 m。沟道的纵比是沟头、沟口高程差与沟道长度的比值,其中,沟头、沟口高程由 DEM 获取,沟道长度由 ArcGIS 空间计算功能提取。随着侵蚀沟长度的增加,沟道纵比逐渐减小。说明东北漫川漫岗区侵蚀沟多数处于发育初、中期,该阶段侵蚀沟沟道纵比较大,可达到 4.59%~6.16%,这使得沟内径流流速冲加快,加剧对沟道的冲刷。该阶段是侵蚀沟高速发育期,侵蚀沟发育潜在危险性较大。

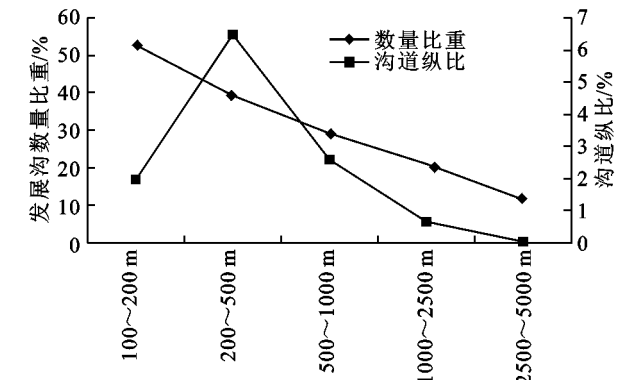


图 3 不同长度分级侵蚀沟数量、纵比

3.2 降雨侵蚀力对侵蚀沟发育影响

降雨是侵蚀沟发育主要动力因素,东北地区夏季降雨集中、多暴雨的气候条件加剧侵蚀沟发育。降雨侵蚀力是降雨强度、降雨历时等因素的综合体现,是衡量降雨侵蚀能力的重要指标,作为水力侵蚀的重要表现形式,侵蚀沟的发育与降雨侵蚀力关系密切<sup>[21]</sup>。章文波基于对我国 71 个代表性气象站资料分析的基础上,提出了基于日降雨量的降雨侵蚀力估算模型<sup>[22]</sup>。该模型完全能够用于估算多年平均降雨侵蚀力及其季节分布,可以准确地计算出我国不同地区降雨侵蚀力<sup>[23]</sup>,研究采用该模型计算降雨侵蚀力。由图 4 可以看出研究区降雨侵蚀力介于 1 310.86~2 923.2[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)],均值为 1 758.08 [(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)],总体看来,东北漫川漫岗区南北两端降雨侵蚀力差别较大,其中南端较大,北端较小,其余区域降雨侵蚀力较为接近。

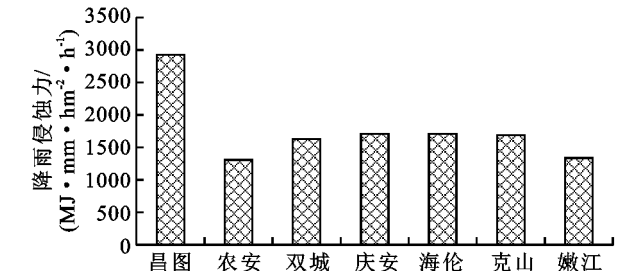


图 4 研究区降雨侵蚀力分布

定义分布密度与降雨侵蚀力比值为降雨一分布密度指数,用以表示单位降雨侵蚀力对侵蚀沟分布密度的影响;定义沟壑密度与降雨侵蚀力比值为降雨一沟壑密度指数,用以表示单位降雨侵蚀力对沟壑密度的影响。由图 5 可以看出,降雨一沟壑密度指标与降雨一分布密度指标变化趋势一致,但各区域差别较大,降雨侵蚀力对海伦、克山、庆安、嫩江侵蚀沟发育影响显著,对双城、农安、昌图侵蚀沟发育影响相对较弱,结合研究区地理位置分布可以看出,降雨侵蚀力对东北漫川漫岗区北部侵蚀沟发育影响显著,对南部影响相对较弱。东北漫川漫岗区北部坡度、坡长较

大,南部坡度、坡长相对较小,地形特征的差别是造成降雨侵蚀力对南北部侵蚀沟发育影响差异的主要原因,降雨侵蚀力一定条件下,随着坡度的增加,坡面径流产生的可能性增加,土体不稳定性增加,易诱发沟蚀,同时,沟内径流流速会随着坡度的增加而加快进而加剧侵蚀沟发育。随着坡长的增加,侵蚀沟发育空间增加,增强降雨侵蚀力对沟蚀的影响,加剧侵蚀沟发育剧烈程度。相对于南部区域,研究区北部冬季极端天气较多,解冻期冻融历时、冻融温差较大,这些会加剧对土壤结构的破坏,降低土壤抗蚀性,加剧降雨侵蚀力对于沟蚀的影响。

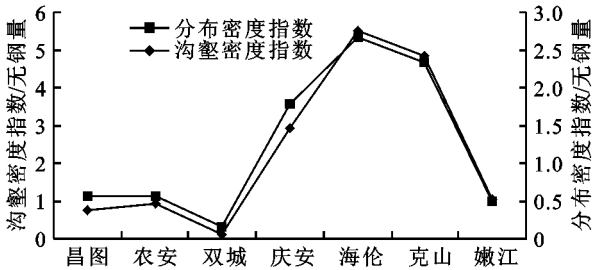


图 5 侵蚀沟分布指标与沟壑密度指标

3.3 地形因素对侵蚀沟发育影响

地形是影响地表水文和土壤侵蚀的主要环境因素,坡度、坡长是反映区域地形特征的主要因素<sup>[24]</sup>。坡度对土壤稳定性、入渗速率具有一定影响,坡度越大,土体的不稳定性越强,在外力作用下发生下移的可能性愈大,降雨过程中土壤的入渗量越小,产生的

径流量越大,因而产生的侵蚀量越大<sup>[25]</sup>。坡长对土壤侵蚀影响较复杂,侵蚀与坡长的关系有时呈正比,有时呈反比,很大程度上决定于降雨特性<sup>[26]</sup>。坡度、坡长交互作用决定集水区特征,通过径流量和流速影响侵蚀沟发育,也可以影响侵蚀沟发育空间,限制侵蚀沟发育状态、规模。

研究区坡度、坡长见图 6,从中可以看出,随着坡度的增加或减小,坡长表现出相同的变化规律,即坡度与坡长成正相关关系。结合图 1(研究区地理位置)可以看出,东北漫川漫岗区北部(嫩江、克山、海伦、庆安)坡度、坡长较大,南部(双城、农安、昌图)坡度、坡长较小。研究区不同坡度、坡长区域面积所占比重见表 1,从中可以看出,研究区地形总体特征为坡长坡缓,坡度多小于 3°,坡长多大于 500 m,坡度小于 3°区域面积占总面积的 74.6%,坡长大于 500 m 区域面积占总面积 44.79%,研究区平均坡度为 2.33°,平均坡长为 696.45 m。

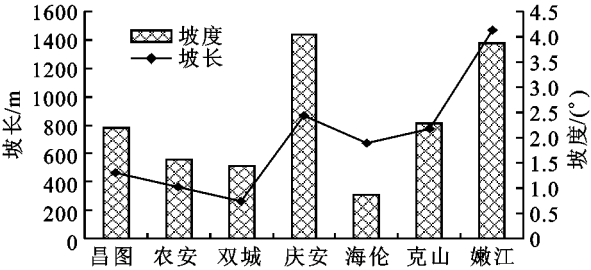


图 6 研究区坡度与坡长

表 1 不同坡度、坡长区域面积所占比重

坡度、坡长	昌图	农安	双城	庆安	海伦	克山	嫩江
0~3°	73.21	79.98	82.75	64.29	93.93	69.58	58.79
3~5°	14.22	13.44	12.24	12.18	4.74	15.10	13.04
5~8°	8.57	5.36	4.08	9.23	1.14	10.83	13.51
>8°	4.00	1.22	0.93	14.30	0.20	4.49	14.66
0~100 m	25.49	15.86	38.00	15.86	27.30	14.49	8.19
100~300 m	27.94	18.97	34.47	18.97	24.54	17.14	10.63
300~500 m	14.80	13.49	13.58	13.49	11.64	12.91	8.67
>500 m	31.77	51.67	13.94	51.67	36.52	55.46	72.51

如图 7 所示,随着东北漫川漫岗区南部(昌图、农安、双城)坡度的减小,沟壑密度逐渐减小,随着北部(庆安、海伦、克山、嫩江)坡度的增加或减小,沟壑密度呈现相反的变化趋势。通过线性回归发现,东北漫川漫岗区南、北部沟壑密度与坡度关系式分别为  $y = 0.115x - 0.14$ ,  $y = -0.103x + 0.587$ , 相关系数分别为 0.882, 0.748, 这说明坡度与东北漫川漫岗区南部、北部沟壑密度分别呈正、负相关关系。南部坡度较小,随着坡度的增加,流速增加,冲刷力增强,同时,土壤稳定性降低,更利于侵蚀沟发育。北部坡度相对较大,随着坡度的增加,加之这一区域坡长较长,径流

的运移状态可能发生改变,削弱径流冲刷力,侵蚀沟发育剧烈程度有所减小。

如图 8 所示,随着坡长的增加,沟壑密度先增加后减小。当坡长较小时,随着坡长的增加,侵蚀沟发育空间增大,径流加速距离增加,这些都会加剧侵蚀沟发育。当坡长大于临界坡长时,随着坡长的增加,径流及其所携带泥沙运移状态有所改变,径流动能降低造成侵蚀沟发育剧烈程度减弱。对于东北漫川漫岗区侵蚀沟发育而言,临界坡长为 900 m,当坡长小于 900 m 时,随着坡长的增加,侵蚀沟发育剧烈程度增加,当坡长大于 900 m 时,随着坡长的增加,侵蚀沟发育剧烈程度降低。

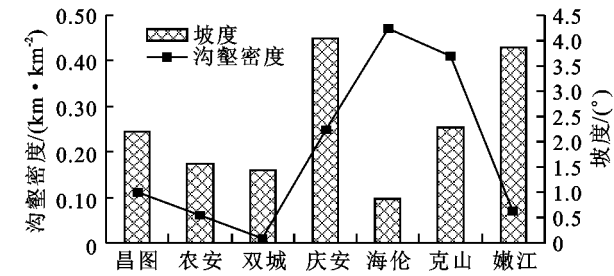


图 7 坡度与沟壑密度关系

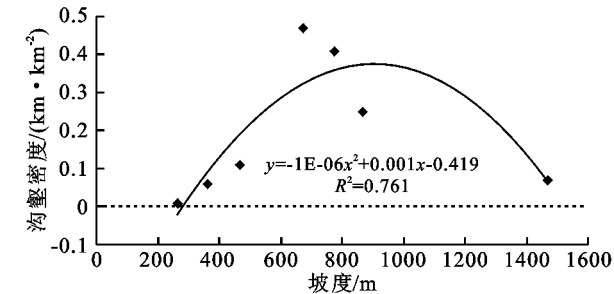


图 8 坡长与沟壑密度关系

坡度与坡长的乘积为地形因子,如图 9 所示,随着东北漫川漫岗区南部(昌图、农安、双城)地形因子的减小,沟壑密度逐渐减小,随着北部(庆安、海伦、克山、嫩江)地形因子的增加或减小,沟壑密度呈现相反的变化趋势,通过线性回归发现,南部、北部沟壑密度与地形因子关系式分别为  $y = 1.3E - 4x - 0.036$ ;  $y = -8E - 5x + 0.532$ , 相关系数分别为 0.947, 0.993, 说明地形因子与南、北部沟壑密度分别呈正、负相关关系。东北漫川漫岗北部地形因子较小,随着地形因子的增加,侵蚀沟发育剧烈程度增加,南部地形因子相对较大,随着地形因子的增加,侵蚀沟发育剧烈程度降低。

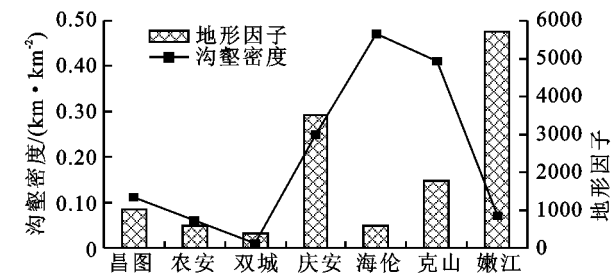


图 9 地形因子与沟壑密度

## 4 结论

研究利用 3s 技术解译东北漫川漫岗区侵蚀沟数量、长度、面积等指标,分析侵蚀沟发育特征,提取坡度、坡长,通过日值降雨数据计算降雨侵蚀力,分析降雨侵蚀力、坡度、坡长对侵蚀沟发育影响,研究发现:

1) 东北漫川漫岗区北部侵蚀沟发育剧烈沟壑密度、分布密度分别为 0.3 km/km², 0.61 条/km², 南部侵蚀沟发育相对较弱,沟壑密度、分布密度分别为 0.06 km/km², 0.18 条/km²。41.26% 的侵蚀沟处于

200~500 m, 33.85% 的侵蚀沟处于 500~1 000 m, 侵蚀沟多数处于发育初、中期,侵蚀沟发育潜在危险性较大。

2) 东北漫川漫岗区降雨侵蚀力介于 1 310.86~2 923.2 [(MJ·mm)/(hm²·h)], 均值为 1 758.08 [(MJ·mm)/(hm²·h)], 南北两端降雨侵蚀力差别较大,其中南端较大,北端较小,其余区域降雨侵蚀力较为接近,地形、冻融历时、温差等方面的差异造成降雨侵蚀力对漫川漫岗区北部影响显著,对南部影响较小。

3) 东北漫川漫岗区坡度与坡长成正相关关系,北部坡度、坡长较大,南部坡度、坡长较小,研究区北部、南部坡度与沟壑密度分别成正、负相关关系,研究区北部、南部地形因子与沟壑密度分别成正、负相关关系;随着坡长的增加,沟壑密度先增加后减小,临界坡长为 900 m。

### 参考文献:

- [1] 伍永秋,刘宝元切沟.切沟侵蚀与预报[J].应用基础与工程科学学报,2000,2(8):134-142.
- [2] 许晓鸿,代全厚.吉林省中东部低山丘陵区沟蚀成因分析及防治[J].吉林水利,1998,4(1):34-35.
- [3] 刘元保.黄土高原坡面沟蚀的危害及其发生发展规律[D].陕西杨陵:中国科学院西北水土保持研究所,1984.
- [4] Govers G. Relations between discharge, velocity, and flow area for rill eroding loss, non-layered material[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17(2): 515-528.
- [5] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. velocity relationships [J]. American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27(3):790-796.
- [6] Wirtz S, Seeger M, Ries J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes [J]. Catena, 2012, 91(S1):21-34.
- [7] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征[J].地理学报,2007,162(11):1165-1173.
- [8] 杜国明,雷国平,宗晓丹.东北典型黑土漫岗区切沟侵蚀空间格局分析[J].水土保持研究,2011,18(2):94-98.
- [9] 孙玉柱,郑粉莉,张姣.基于 LIDAR 和 GIS 技术的坡面侵蚀沟空间发育分析[J].水土保持研究,2014,21(3): 20-24.
- [10] Vrieling A, Rodrigues S C, Bartholomeus H, et al. Automatic identification of erosion gullies with ASTER imagery in the Brazilian Cerrados [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(12):2723-2738.
- [11] J. A. Martínez-Casasnovas. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion[J]. Catena, 2003, 12(50):293-308.

- [9] 艾尼瓦尔·米热古力,依米提·海米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等.基于小波分析的伊塞克湖水位变化特征[J].水土保持研究,2014,21(1):168-172.
- [10] Percival D B, Wang M, Overland J E. An introduction to wavelet analysis with applications to vegetation time series[J]. Community Ecology, 2004, 5(1):19-30.
- [11] 夏库热·塔依尔,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等.基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J].水土保持研究,2014,21(1):142-146.
- [12] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945:245-259.
- [13] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3):350-363.
- [14] 莫淑红,沈冰,季瑞瑞,等.西安市区地表供水水源径流变化规律分析[J].干旱区研究,2006,23(1):183-188.
- [15] 郑红星,刘昌明.黄河源区径流年内分配变化规律分析[J].地理科学进展,2003,22(6):585-590.
- [16] 王杰,王俊,申金玉.新疆博斯腾湖入湖水量变化及其对湖水位的影响分析[J].水资源与水工程学报,2013, 24(4):199-202.
- [17] 王润,高前兆.近期博斯腾湖水位变化及其原因分析[J].冰川冻土,2003,25(1):60-64.
- [18] 吴敬禄,马龙,曾海鳌.新疆博斯腾湖水质水量及其演化特征分析[J].地理科学,2013,33(2):231-237.
- [19] 邱辉,赵巧华,朱伟军,等.博斯腾湖水位变化特征及其可能影响机制分析[J].气象科学,2013,33(3):289-295.
- [20] 马丽娟,赵景峰,张宏俊,等.气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响[J].干旱区地理, 2010, 3(2):210-216.
- [21] 王维霞,王秀君,姜逢清,等.开都河流域上下游过去 50 a 气温降水变化特征分析[J].干旱区地理,2012,35(5):746-753.
- [22] 刘丽梅,赵景峰,张建平,等.近 50 a 博斯腾湖逐年水量收支估算与水平衡分析[J].干旱区地理,2013,36(1): 33-39.
- [23] 高华中,姚亦锋.近 50 a 来人类活动对博斯腾湖水位影响的量化研究[J].地理科学,2005,25(3):305-309.
- [24] 陈亚宁,杜强,陈跃滨.博斯腾湖流域水资源可持续利用研究[M].北京:科学出版社,2013.

~~~~~

(上接第 51 页)

- [12] 闫业超,张树文,李晓燕,等.黑龙江克拜黑土区 50 多年来侵蚀沟时空变化[J].地理学报,2005,60(6):1015-1020.
- [13] 范昊明,顾广贺,王岩松,等.东北黑土区侵蚀沟发育与环境特征[J].中国水土保持,2013,10:75-79.
- [14] 阎百兴,杨育红,刘兴土.东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J].中国水土保持,2008(12):26-30.
- [15] 范昊明,王铁良,蔡强国,等.东北黑土漫岗区侵蚀沟发展模式研究[J].水土保持研究,2007,14(6):328-330.
- [16] 张永光,伍永秋,刘洪鹄,等.东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J].水土保持学报,2007, 21(1):35-38.
- [17] 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):4449-4454.
- [18] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等.基于 GIS 和 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法初报[J].水土保持通报,2010, 30(2):203-206.
- [19] 张宏鸣,杨勤科,李锐,等.流域分布式侵蚀学坡长的估算方法研究[J].水利学报,2012,43(4):437-443.
- [20] 谢云,章文波,刘宝元.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [21] 张旭,顾广贺,范昊明,等.东北黑土区降雨侵蚀力与侵蚀沟发育关系研究[J].沈阳农业大学学报,2014, 45(2):249-252.
- [22] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [23] 刘艳,王东梅.我国降雨侵蚀力计算方法研究进展[J].水土保持应用技术,2007,3(5):45-47.
- [24] 郭明航,杨勤科,王春梅.中国主要水蚀典型区侵蚀地形特征分析[J].农业工程学报,2013,29(13):81-89.
- [25] 胡世雄,靳长兴.坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与试验研究[J].地理学报,1999,54(4):1-9.
- [26] 孔亚平,张科利.黄土坡面侵蚀产沙沿程变化的模拟试验研究[J].泥沙研究,2003,3(1):33-38.