

甘肃省黄土高原典型小流域侵蚀沟道特征

石万里¹, 王守俊², 张富¹

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省水利厅水土保持局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 对甘肃省黄土高原典型小流域侵蚀沟道的分级分类进行简要研究, 为进一步推动该区水土保持和生态治理工作提供理论基础。[方法] 在甘肃省第一次全国水利普查结果的基础上, 运用 GIS 技术, 采用地貌几何定量数学模型分级方法, 量化分级沟道, 并从地质、地貌、大小以及形状对侵蚀沟道进行分类, 由此来推断黄土高原区侵蚀沟道的特征。[结果] 甘肃黄土高原典型小流域侵蚀沟道主要以 I 级沟道为主, 其中丘陵沟壑区主要以半开析、中度割裂、半主沟型为主; 高塬沟壑区主要以半开析、中度割裂、支沟型为主。[结论] 丘陵沟壑区第五副区沟壑狭窄陡峭, 沟道破碎化程度高, 水土流失量高, 治理难度大, 沟道难以利用。

关键词: 黄土高原; 小流域; 侵蚀沟道; 分级分类

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0236-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 石万里, 王守俊, 张富. 甘肃省黄土高原典型小流域侵蚀沟道特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 236-241. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.040; Shi Wanli, Wang shoujun, Zhang Fu. Characteristics of erosion gullies in small watershed scale on Loess Plateau in Gansu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 236-241. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.040

Characteristics of Erosion Gullies in Small Watershed Scale on Loess Plateau in Gansu Province

SHI Wanli¹, WANG Shoujun², ZHANG Fu¹

(1. Forestry College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Soil and Water Conservation Bureau, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The paper studied the classification of the erode gullies in small typical watersheds on the loess plateau in Gansu Province aimed to lay foundation for the better development of soil and water conservation and ecological management in the Loess Plateau. [Methods] Based on the results of the first national water resources and water power investigation, using GIS technology and math model of physiognomy geometry ration, the gullies were graded quantitatively and erosion gullies are classified from geology, geomorphology, size, and shape. Therethrough, the characteristics of erosion gullies in the Loess Plateau were inferred from. [Results] The results showed that in small watershed scale on Loess Plateau in Gansu Province, most of the erosion gullies are those, in hilly and gully regions, that have semi-opened, moderate fragmented and semi-main groove typed characteristics; In Loess gully regions, that have semi-opened, moderate fragmented and branch gully typed characteristics. [Conclusion] In the hilly and gully region, the fifth gully is narrow and steep, the gully fragmentation is high and the amount of soil erosion is great. It is difficult to manage and use the gullies.

Keywords: Loess Plateau; watershed; erosion gullies; classification

黄土高原坡沟系统不但是区域侵蚀的沙源地, 而且对控制水土流失、恢复和重建生态系统有着重要的

作用。黄土高原主要的形成是由于在第四纪以来, 黄土高原分水岭区基本上一直以上升为主, 是侵蚀、剥

收稿日期: 2016-12-15

修回日期: 2017-01-03

资助项目: 甘肃省水利普查科研专项“甘肃黄土高原侵蚀沟道特征与水沙资源保护利用研究”

第一作者: 石万里(1980—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市人, 硕士, 讲师, 主要从事水土保持学方面的研究。E-mail: shiwl@gsau.edu.cn。

通讯作者: 张富(1961—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持配置及环境整治与生态修复研究。E-mail: fuzhang001@163。

蚀区。梁、卯区也属上升区,但曾接受沉积,有过相对下沉的时期。而塬区却经历了下降—缓慢上升—强烈上升几个构造阶段,导致古盆地逐渐抬高为高平原,最后终于一跃而成为著名的黄土高原^[1]。对黄土高原沟壑系统侵蚀现象与规律的研究,始终是黄土高原环境整治中很重要的科学命题。对具有代表性的小流域进行沟道侵蚀特征研究对揭示区域侵蚀特征有着重要意义,并对更有效开展黄土高原地区水土保持工作有着重要的指导意义。在沟道治理之前首先要将小流域里的沟道进行分级,这是进行沟道治理的一项基础工作。为了使沟道不但在级别上能够反映其侵蚀规律,而且使其能够进行同级之间的比较,进而能够有利于坝系的布局。付明胜等^[2-3]针对中国在沟道分级中存在的问题,采用美国地貌学家 Hortun 等^[4]提出的地貌几何定量数学模型分级方法,在 $1/10^8$ 地形图上进行了分级:一级水道是指在一个流域内,最小的不可分支的支沟;二级水道是指由2个一级水道汇合后组成的新的水道;三级水道是指由2个二级水道汇合后的水道;以此类推,直到将整个流域中的水道划分完毕。付明胜等^[2]运用这个方法分析了黄土丘陵沟壑区3条典型小流域的坝系现状和坝系规划,并达到了预期效果。在其研究中,根据不同的沟级设置了不同规模大小的工程,这样可以使坝系布局具有合理性、科学性和规范性,同时使地貌研究呈定量化发展。可见,采用美国地貌几何定量数学模型的分级方法具有很强的理论意义和实践意义。国外有关沟道的分类主要是源于对泥石流和山洪产生过程的荒溪分类^[5]。中国许多学者根据坡面侵蚀的形成原理将沟道划分为指沟、细沟、浅沟、切沟、冲沟、沟道和河川等类型,指沟是指自分水线开始顺坡向下流动的过程由于受到地形的制约,逐步向低处集中,开始冲成纹沟,进而发展成指沟,指沟形成在细沟之前^[6]。刘增文等^[7]对黄土残塬区侵蚀沟道分类的研究表明,反映沟道特征的众多指标中,沟道的地貌形态对治理开发最具实践意义,他们运用1:1万地形图对陕西省长武县境内的沟道进行了随机抽样调查并选取了18条沟道进行系统的图上测量和实地调查,并在其研究中按照沟道割裂状况、沟道开析状况和主支沟3个不同角度对沟道进行了分类。本文是在甘肃省第一次全国水利普查结果的基础之上,在甘肃黄土高原区运用GIS技术,对侵蚀沟道采用地貌几何定量数学模型分级方法,定量化分级沟道,并从地质、地貌、大小以及形状对侵蚀沟道进行分类,从而为更好的在黄土高原地区开展水土保持和生态治理工作打下基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃黄土高原区位于甘肃省中东部,属西北黄土高原的西部,北接宁夏,南以迭山、西秦岭分水岭为界,东邻陕西,西至乌鞘岭和青海。地理位置位于北纬 $33^{\circ}6'—37^{\circ}39'$,东经 $100^{\circ}43'—108^{\circ}42'$ 。甘肃黄土高原区内除分布有少量的土石山区外,其余均为黄土覆盖,黄土厚度一般在10—300 m,海拔高度在1 000~3 000 m,地势由西北向东南倾斜,沟壑密度多在 $1.8\sim 2.5\text{ km/km}^2$,平均为 2.13 km/km^2 。研究区内以黄土丘陵沟壑第三、第五副区和黄土高塬沟壑区三个类型区面积最大。黄土丘陵沟壑第三副区(以下简称“丘三区”)位于陇中东南部,介于东经 $104^{\circ}18'—106^{\circ}21'$,北纬 $34^{\circ}23'—35^{\circ}45'$,总面积 $1.81\times 10^4\text{ km}^2$,其中水土流失面积占96.8%,属黄土高原严重流失区。黄土丘陵沟壑第五副区(以下简称“丘五区”)位于东经 $102^{\circ}36'—105^{\circ}20'$,北纬 $35^{\circ}21'—37^{\circ}37'$,总面积 $4.12\times 10^4\text{ km}^2$ 。黄土高塬沟壑区位于甘肃省东部,北部与环县、华池、庆城、固原一线,黄土丘陵沟壑第二副区邻近,西南邻近达溪河与丘三区相连,东靠子午岭,西近六盘山,东南与陕西省长武县相连,介于东经 $106^{\circ}40'—108^{\circ}25'$,北纬 $34^{\circ}37'—35^{\circ}52'$,总面积 $1.51\times 10^4\text{ km}^2$ 。

1.2 典型小流域选取

基于甘肃省第一次全国水利普查的相关结果,在甘肃黄土高原丘三区、丘五区、高塬沟壑区,选择罗玉沟、吕二沟、安家沟、高泉沟、称沟河、南小河沟等典型试验小流域和试点示范小流域,所选择流域涵盖了该区域有长时间监测数据的小流域,具体信息详见表1。

表1 选取典型小流域信息

流域名称	流域面积/ km^2	所属区域
罗玉沟流域	72.79	丘三区
吕二沟流域	12.21	丘三区
安家沟流域	8.56	丘五区
高泉沟流域	9.17	丘五区
称沟河流域	118.13	丘五区
南小河沟流域	36.30	高塬沟壑区

1.3 数据分析

1.3.1 沟道分级 利用卫星影像和DEM,1:5万数字地图(DLG),或者在1:1万地形图,选择不同类型区研究小流域,按照甘肃省第一次全国水利普查的要求,对沟道面积 $0\sim 5\,000\text{ hm}^2$,沟道长度大于等

于 500 m 的沟道进行分级研究。在 ArcGIS 9.3 上采用 Horton-Strahler 地貌几何定量数学模型分级方法,对不同类型区所要研究的小流域进行分级^[8-10]。第一级水道是指最小的且不可分支的支沟;二级水道是指由 2 个一级水道汇合后组成的新的水道;三级水道是指 2 个二级水道汇合后组成的水道;以此类推,直到整个流域水道划分完毕。通过整个流域的水沙河槽为最高级水道,也就是这个小流域的流域等级^[11]。另外指出,所有的间歇性水道和永久性水道,只要它们具有特征明显的稳定性谷地,都可以根据序列的命名原则进行分级。

1.3.2 沟道分类 在典型小流域的地形图或影像图上对已经分级的沟道进行系统的实地调查和图上量测。实地调查包括对流域界限和沟缘线的勾绘、沟道及沟头的治理与利用情况调查等^[12-16];图上量测包括对每条沟道的流域面积、沟壑面积、沟道长度(主沟长、各级支沟长和沟道全长)、沟壑密度、沟道相对高差等特征值的测算;然后根据以下公式计算每条沟道的开析度、地面割裂度和主支沟系数等地貌形态特征值^[17]。

(1) 按沟道的开析状况分类

$$K = D/H = 1000A/(LH) \quad (1)$$

式中: K ——沟道开析度; D ——沟道平均宽(m); H ——沟道平均相对高差(m); A ——沟壑面积(km^2); L ——沟道全长(km)。

根据以上计算所得结果,求其 K 的平均值 \bar{K} 和标准差 σ_{n-1} ,然后按照高于平均值一个标准差为一级、低于平均值一个标准差为一级、中间为一级的原则,将沟道划为开析型、半开析型、深切型 3 个类型^[18-19]。即:

开析型: $K_1 > \bar{K} + \sigma_{n-1}$; 半开析型: $K_2 = \bar{K} \pm \sigma_{n-1}$; 深切型: $K_3 < \bar{K} - \sigma_{n-1}$ 。

(2) 按沟道的割裂状况分类

$$G = (A/S) \times 100\% \quad (2)$$

式中: G ——地面割裂度(%); A ——沟壑面积(km^2); S ——流域面积(km^2)。

根据以上计算所得结果,求其 G 的平均值 \bar{G} 和标准差 σ_{n-1} ,然后按高于平均值一个标准差为一级、低于平均值一个标准差为一级、中间为一级的原则,将沟道划为强度割裂型、中度割裂型、弱度割裂型 3 个类型^[20-24]。即:

强度割裂型: $G_1 > \bar{G} + \sigma_{n-1}$; 中度割裂型: $G_2 = \bar{G} \pm \sigma_{n-1}$; 弱度割裂型: $G_3 < \bar{G} - \sigma_{n-1}$ 。

(3) 按沟道主支沟状况分类

$$R = L_0/L \quad (3)$$

式中: R ——主支沟系数; L_0 ——主沟道长(m); L ——沟道全长(m)。

根据以上计算所得结果,求其 R 的平均值 \bar{R} 和标准差 σ_{n-1} ,然后按高于平均值一个标准差为一级、低于平均值一个标准差为一级、中间为一级的原则,将沟道划为主沟型、半主沟型、支沟型 3 个类型^[24-25]。即:

主沟型: $R_1 > \bar{R} + \sigma_{n-1}$; 半主沟型: $R_2 = \bar{R} \pm \sigma_{n-1}$; 支沟型: $R_3 < \bar{R} - \sigma_{n-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 侵蚀沟道分级研究

通过运用不同类型区典型流域的卫星影像图和地形图,对大于 500 m 的沟道进行系统的实地调查(主要包括流域界限和沟缘线的勾绘)和图上测量(主要包括沟道流域面积、沟壑面积及沟道相对高差特征值的测量及计算,如图 1 所示)。同时沟道的分级结果表明,3 个类型区典型小流域的沟道基本可以分为 5 级,主要以 I 级沟道为主。丘三区 I 级沟道 28 条,平均沟长 1 146.51 m,高差 149.43 m,平均比降 0.13%,平均沟道面积 103.35 hm^2 ,平均宽度 864.92 m; II 级沟道 4 条,平均沟长 1 943.00 m,高差 219.50 m,平均比降 0.15%,平均沟道面积 139.50 hm^2 ,平均宽度 670.20 m; III 级沟道 5 条,平均沟长 568.80 m,高差 125.00 m,平均比降 0.23%,平均沟道面积 14.48 hm^2 ,平均宽度 222.81 m。该区域没有 IV 或 V 级沟道。丘五区 I 级沟道 80 条,平均沟长 1 219.46 m,高差 178.38 m,平均比降 16.28%,平均沟道面积 21.46 hm^2 ,平均宽度 176.83 m; II 级沟道 20 条,平均沟长 2 321.89 m,高差 133.00 m,平均比降 8.73%,平均沟道面积 33.61 hm^2 ,平均宽度 135.08 m; III 级沟道 9 条,平均沟长 5 056.25 m,高差 226.67 m,平均比降 5.24%,平均沟道面积 71.78 hm^2 ,平均宽度 138.75 m; IV 级沟道 4 条,平均沟长 4 638.90 m,高差 193.75 m,平均比降 4.48%,平均沟道面积 76.08 hm^2 ,平均宽度 168.94 m; V 级沟道 1 条,沟长 1 175.41 m,高差 215.00 m,比降 19.29%,沟道面积 60.62 hm^2 ,宽度 515.75 m。高塬沟壑区 I 级沟道 20 条,平均沟长 1 038.60 m,高差 167.25 m,平均比降 0.18%,平均沟道面积 1.17 hm^2 ,平均宽度 312.30 m; II 级沟道 2 条,平均沟长 1 005.50 m,高差 165 m,比降 0.16%,平均沟道面积 0.95 hm^2 ,平均宽度 445 m; III 级沟道 1 条,沟长 9 374 m,高差 315 m,平均比降 0.03%,沟道面积 10.96 hm^2 ,宽度 871 m。该区域没有 IV 或 V 级沟道。由分析可知,丘三区沟道

较宽且较为平缓,丘五区沟道细长陡峭,高原沟壑区沟道细长而平缓。因此丘五区更容易发生河流侵蚀和降雨侵蚀^[26-27]。

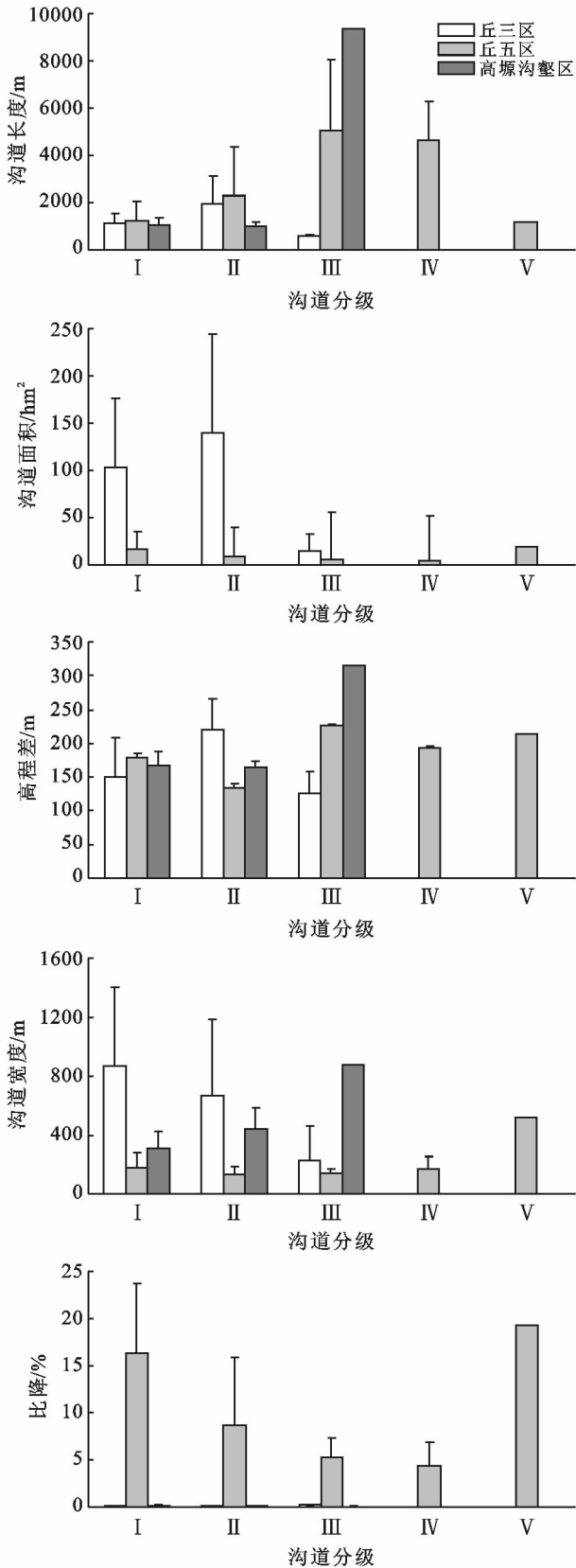


图 1 3 个类型区典型流域侵蚀沟道分级信息

2.2 侵蚀沟道分类研究

2.2.1 按沟道的开析状况分类 沟道的开析状况是指沟道的开张程度,主要用来表示沟道宏观地形开阔特征。一般情况下,沟道开析度越大,沟壑就越开阔,沟坡就越平缓,沟道的立地条件就越好,开发利用潜力愈大^[28-29]。各类型区开析度 K 的划分标准如表 2 所示,开析度分类见图 2。丘三区 I 级沟道中,开析型 2 条,半开析型 25 条,深切型 1 条; II 级沟道中开析型 1 条,半开析型 3 条; III 级沟道中开析型 1 条,半开析型 3 条,深切型 1 条。丘五区 I 级沟道中,开析型 9 条,半开析型 67 条,深切型 4 条; II 级沟道中开析型 4 条,半开析型 14 条,深切型 12 条; III 级沟道中半开析型 7 条,深切型 2 条; IV 级沟道中开析型 1,半开析型 2 条,深切型 1 条; V 级沟道中开析型 1 条。在高原沟壑区 I 级沟道中,开析型 3 条,半开析型 15 条,深切型 2 条; II 级沟道中开析型 1 条,半开析型 1 条; III 级沟道中开析型 1 条。分析可知,丘五区开析度 K 较丘三区和高原沟壑区小,沟壑狭窄,沟坡陡峭,水土流失风险较大,不容易开发利用。

表 2 各类型区典型小流域开析状况划分标准

类型区	沟道类型	划分标准
丘三区	开析型	$K_1 > 3.61$
	半开析型	$K_2 = 1.51 \sim 3.61$
	深切型	$K_3 < 1.51$
丘五区	开析型	$K_1 > 1.83$
	半开析型	$K_2 = 0.43 \sim 1.83$
	深切型	$K_3 < 0.43$
高原沟壑区	开析型	$K_1 > 2.61$
	半开析型	$K_2 = 1.32 \sim 2.61$
	深切型	$K_3 < 1.32$

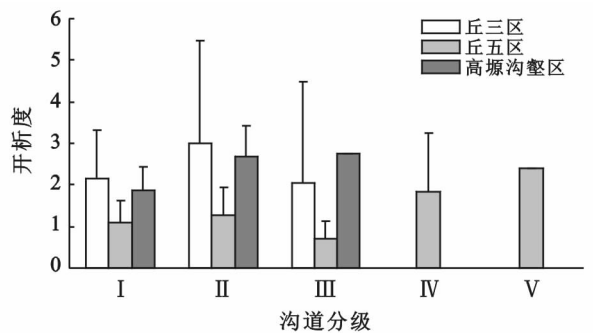


图 2 各类型区典型小流域沟道开析度

2.2.2 按沟道的割裂状况分类 沟道的割裂状况用地面割裂度 G 来反映。在一定的地域范围内,地面割裂度 G 值越高,说明沟壑面积越大,沟谷面积越小,地形越破碎,水土流失面积越大,治理任务也越艰

巨,开发利用程度也越难,治理措施更需要加强配置^[28-29]。各类型区割裂度 G 的划分标准详见表 3,割裂状况分类如图 3 所示。丘三区 I 级沟道中,强度割裂型 3 条,中度割裂型 19 条,轻度割裂型 7 条; II 级沟道中强度割裂型 2 条,中度割裂型 2 条; III 级沟道中强度割裂型 2 条,中度割裂型 3 条。丘五区 I 级沟道中,强度割裂型 1 条,中度割裂型 27 条,轻度割裂型 52 条; II 级沟道中强度割裂型 3 条,中度割裂型 14 条,轻度割裂型 3 条; III 级沟道中强度割裂型 4 条,中度割裂型 3 条,轻度割裂型 2 条; IV 级沟道中强度割裂型 2 条,中度割裂型 2 条; V 级沟道中强度割裂型 1 条。高塬沟壑区 I 级沟道中,强度割裂型 3 条,中度割裂型 12 条,轻度割裂型 5 条; II 级沟道中中度割裂型 1 条; III 级沟道中强度割裂型 1 条。3 个类型区中丘三区和高塬沟壑区的割裂度 G 值较大,说明这两个区域沟谷面积小,地形破碎。

表 3 各类型区典型小流域割裂状况划分标准

类型区	沟道类型	划分标准
丘三区	强度割裂型	$G_1 > 62.24$
	中度割裂型	$36.94 \leq G_2 \leq 62.24$
	轻度割裂型	$G_3 < 36.94$
丘五区	强度割裂型	$G_1 > 20.57$
	中度割裂型	$3.93 \leq G_2 \leq 20.57$
	轻度割裂型	$G_3 < 3.93$
高塬沟壑区	强度割裂型	$G_1 > 67.61$
	中度割裂型	$22.47 \leq G_2 \leq 67.61$
	轻度割裂型	$G_3 < 22.47$

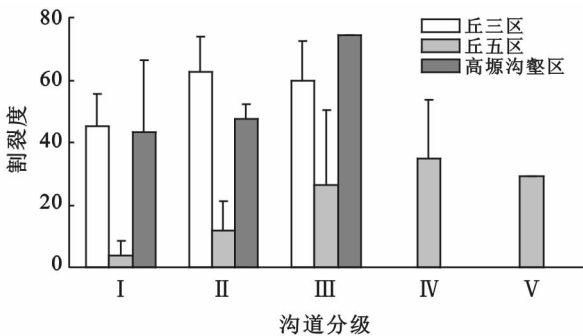


图 3 各类型区典型小流域沟道割裂度

2.2.3 按沟道主支沟状况分类 沟道主支沟状况反映了沟道的支沟发育程度和数量,同时也间接的反映了流域沟道切割的破碎程度,对反映沟道的地形状况及沟道治理具有指导作用^[30]。各类型区的主支沟系数 R 的划分标准如表 4 所示,主支沟系数分类见图 4。丘三区 I 级沟道中,主沟型 2 条,半主沟型 23 条,

支沟型 3 条; II 级沟道主沟型 4 条; III 级沟道主沟型 5 条。丘五区 I 级沟道中,主沟型 21 条,半主沟型 54 条,支沟型 5 条; II 级沟道中半主沟型 12 条,支沟型 8 条; III 级沟道中半主沟型 1 条,支沟型 8 条; IV 级沟道支沟型 4 条; V 级沟道半主沟型 1 条。高塬沟壑区 I 级沟道支沟型 20 条; II 级沟道支沟型 2 条; III 级沟道主沟型 1 条。三个类型区中以丘五区主支沟系数最大,说明区域沟道切割较大,破碎程度较高。

表 4 各类型区典型小流域主支沟状况划分标准

类型区	沟道类型	划分标准
丘三区	主沟型	$R_1 > 0.90$
	半主沟型	$0.16 \leq R_2 \leq 0.90$
	支沟型	$R_3 < 0.16$
丘五区	主沟型	$R_1 > 1.58$
	半主沟型	$0.3 \leq R_2 \leq 1.58$
	支沟型	$R_3 < 0.3$
高塬沟壑区	主沟型	$R_1 > 0.10$
	半主沟型	$0 \leq R_2 \leq 0.10$
	支沟型	$R_3 < 0$

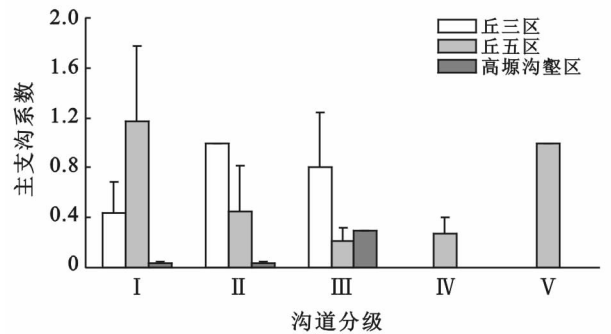


图 4 各类型区典型小流域沟道主支沟系数

3 讨论与结论

(1) 丘三区的 I 级沟道中, I₁₄ 型(半开析+中度割裂+半主沟型)的沟道所占比例最高, 占总沟道条数的 39.5%, 占总面积的 44.38%; 在 II 级沟道中, 以 II₁₀ 型(半开析+强度割裂+主沟型)最高, 占总沟道条数的比例为 5.3%, 占总面积的 6.02%; 在 III 级沟道中以 III₁₀ 型(半开析+强度割裂+主沟型)为最高, 占总沟道条数的比例为 5.3%, 占总面积的 0.13%。

(2) 在丘五区的 I 级沟道中, I₁₅ 型(半开析+轻度割裂+半主沟型)的沟道所占比例最高, 占总沟道条数的 27.9%, 占总面积的 20.41%; 在 II 级沟道中为 II₁₄ 型(半开析+中度割裂+半主沟型)占总沟道条数的 6.1%, 占总面积的 6.67%; 在 III 级沟道中 III₁₆ 型(半开析+强度割裂+支沟型)、III₁₇ 型(半开析

十中度割裂+支沟型)、Ⅲ₂₅型(深切析+强度割裂+支沟型)、Ⅲ₁₈型(开析+轻度割裂+支沟型)的沟道条数所占比例均为1.8%,而半开析+中度割裂+支沟型所占的面积最大,占总面积的8.74%;在Ⅳ级沟道中,各个类型的沟道条数所占比例均为总条数的0.9%,而开析+中割裂度+支沟型的沟道面积最大,占总面积的4.26%;在Ⅴ级沟道中,仅有Ⅳ₄型(开析+强度割裂+半主沟型)一种类型,占沟道总条数的0.9%,占总面积的1.78%。

(3) 在高塬沟壑区的Ⅰ级沟道中,Ⅰ₁₇型(半开析+中度割裂+支沟型)沟道所占比例最高,占总沟道条数的34.7%,占总面积的17.34%;在Ⅱ级沟道中Ⅱ₁₇型(半开析+中度割裂+支沟型)与Ⅱ₈型(开析+中度割裂+支沟型)的沟道条数所占比例相同,为总沟道条数的4.4%,分别占总面积的1.9%与3.92%;在Ⅲ级沟道中,Ⅲ₁型(开析+强度割裂+主沟型)的沟道占总沟道条数的4.4%,占总面积的51.56%。

(4) 丘陵沟壑区第五副区沟壑狭窄陡峭,地形破碎,坡陡沟深,沟道破碎化程度高,水土流失量高,治理难度大,沟道难以利用,应加强该区域水土流失的研究和治理。

[参 考 文 献]

- [1] 阎隆瑞,范蕙. 中国黄土高原的形成及其黄土成因的探讨[J]. 科学通报,1988,33(9):690-692.
- [2] 付明胜,任兆选,白平良. 地貌几何数学模型在黄土高原沟道分级和坝系规划中的应用[J]. 中国水土保持科学,2003,1(4):25-27.
- [3] 付强,彭红,杨红新,等. 基于 ArcGIS Hydrology 工具的沟道分级特征值选取[J]. 中国水土保持,2009(3):55-57.
- [4] 王晓朋,潘懋,任群智. 基于流域系统地貌信息熵的泥石流危险性定量评价[J]. 北京大学学报:自然科学版,2007,43(2):211-215.
- [5] 王礼先. 流域管理学[M]. 北京:中国林业出版社,1999:181-195.
- [6] 关君蔚. 水土保持原理[M]. 北京:中国林业出版社,1996:1-10.
- [7] 刘增文,李雅素. 黄土残塬区侵蚀沟道分类研究[J]. 中国水土保持,2003(9):28-30.
- [8] 蒋德麒,赵诚信,陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析[J]. 地理学报,1966,32(1):20-36.
- [9] 陈浩,王开章. 黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究[J]. 地理研究,1999,18(4):363-372.
- [10] 马宁,赵帮元,王富贵,等. 水土流失治理背景下小流域泥沙来源初探:以皇甫川流域西五色浪沟小流域为例[J]. 中国水土保持科学,2011,9(5):15-19.
- [11] 姚文艺,肖培青. 黄土高原土壤侵蚀规律研究方向与途径[J]. 水利水电科技进展,2012,32(2):73-78.
- [12] 陆中臣. 流域侵蚀产沙和物质转移[J]. 地理研究,1989,8(2):101-111.
- [13] 景可,陈永宗. 我国土壤侵蚀与地理环境的关系[J]. 地理研究,1990,9(2):29-38.
- [14] 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响[J]. 水土保持学报,1992,6(2):17-23.
- [15] 陈浩. 流域系统水沙过程变异规律研究进展[J]. 水土保持学报,2001,15(5):102-107.
- [16] 肖培青,郑粉莉,姚文艺. 坡沟产沙关系及其侵蚀机理研究进展[J]. 水土保持研究,2004,11(4):101-104.
- [17] 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区水土流失规律及治理效益[J]. 人民黄河,1980(2):20-25.
- [18] 焦菊英,刘元保,唐克丽. 小流域沟间与沟谷地径流泥沙来量的探讨[J]. 水土保持学报,1992,6(2):24-28.
- [19] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. 水利学报,2010,41(7):870-875.
- [20] Horton R E, Leach H R, Vliet R V. Laminar sheet-flow [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1934,15(2):393-404.
- [21] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. Geological Society of America Bulletin, 1945,56(3):275-370.
- [22] 张学雷,陈杰. 德国土壤科学的研究进展[J]. 土壤通报,2003,34(6):558-561.
- [23] 郑粉莉,王占礼,杨勤科. 土壤侵蚀学科发展战略[J]. 水土保持研究,2004,11(4):1-10.
- [24] 张松柏. 庆阳市董志塬水土保持对策研究[J]. 西北农林科技大学学报:社会科学版,2012,12(2):67-72.
- [25] 杨晓珍,高春河,朱嫣. 宁南山区水土保持工程固沟模式探索[J]. 中国水土保持,2010(2):47-48.
- [26] 刘会源,宋锦霞,牛萍. 黄土高原地区沟道工程的水保作用与防洪功效[J]. 水土保持研究,2004,11(3):204-207.
- [27] 王万忠,焦菊英,马丽梅,等. 黄土高原不同侵蚀类型区侵蚀产沙强度变化及其治理目标[J]. 水土保持通报,2012,32(5):1-7.
- [28] 张胜利,崔云鹏. 渭北高原沟壑区沟道治理工程体系配置优化研究[J]. 西北林学院学报,1995,10(S1):39-46.
- [29] 高鹏,蒋定生. 黄土高原丘陵沟壑区沟道水资源利用模式初探[J]. 水土保持研究,2000,7(2):77-79.
- [30] 雷阿林,唐克丽,王文龙. 土壤侵蚀链概念的科学意义及其特征[J]. 水土保持学报,2000,14(3):79-83.