

# 子午岭地区坡面浅沟侵蚀临界模型研究

晓斌<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 王彬<sup>1,2</sup>, 张鹏<sup>1,2</sup>, 陈吉强<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部  
水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 利用子午岭地区梁坡高精度的 GPS(Trimble 5700) 实测数据对国内外已有的浅沟侵蚀临界模型进行了验证。结果表明, 已有浅沟侵蚀临界模型模拟的子午岭地区浅沟侵蚀分布面积或大于实际浅沟侵蚀区的 10%~40%, 或小于实际的 20%~35%。基于子午岭地区实测的梁坡 GPS 数据建立高分辨率的 DEM, 构建了适用于子午岭地区的浅沟侵蚀临界模型。利用实测 GPS 数据对所建浅沟侵蚀临界模型进行验证, 发现用新建的浅沟侵蚀临界模型模拟的研究区梁坡浅沟侵蚀分布区与野外实际浅沟侵蚀分布区非常吻合, 其误差仅为 5%。

**关键词:** 浅沟侵蚀; 临界模型; 高精度 GPS 测量; 子午岭地区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2011)03-0122-04

中图分类号: 157.1

## Predicting Ephemeral Gully Erosion on Hillslopes of Ziwuling Area

DING Xiaobin<sup>1,2</sup>, ZHENG Fenli<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, CHEN Jiqiang<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Based on high-precision GPS(Trimble 5700) measurement data on hillslopes of Ziwuling area, this paper validated the existing models for predicting ephemeral gully erosion thresholds. The results show that the existing models were 10%~40% over-predicting or 20%~35% under-predicting of the distribution area of ephemeral gully erosion on hillslopes. A new critical model for predicting ephemeral gully erosion on hillslopes was then established through the high-resolution DEM generated by GPS, GIS and statistical analysis. The GPS measurement data on hillslopes of the Ziwuling area were then used to validate the newly established critical model. The results show that the new model well predicted the distribution area of ephemeral gully erosion on hillslopes with a low relative error of 5%.

**Keywords:** ephemeral gully erosion; critical model; high-precision GPS measurement; Ziwuling area

浅沟侵蚀是坡面土壤侵蚀的一种重要侵蚀方式, 是坡面侵蚀从细沟侵蚀向切沟侵蚀发展演化的一种过渡侵蚀类型, 在坡沟侵蚀系统中起着承上启下的特殊作用。研究表明<sup>[1-2]</sup>, 黄土高原浅沟分布面积约占沟间地总面积的 56%~78%。而在浅沟分布密度较大的地区其侵蚀量可占到坡面总侵蚀量的 50%~80%。张科利等<sup>[3]</sup>的研究结果表明, 浅沟侵蚀带侵蚀量约占沟间地总侵蚀量的 70%。郑粉莉<sup>[4]</sup>通过对野外大型自然坡面径流场观测资料的研究表明, 浅沟侵蚀带的侵蚀产沙量占整个坡面侵蚀产沙量的 52.1%~64.1%。可见, 浅沟侵蚀在黄土高原丘陵沟壑区分布较广, 浅

沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的比重较大, 其发生发展在坡面土壤侵蚀中占有极其重要的地位。因此, 浅沟侵蚀的定量化研究, 就成为构建黄土高原地区分布式土壤侵蚀预报模型的重要组成部分, 而浅沟侵蚀临界模型的建立是坡面浅沟侵蚀定量化研究的基础。

浅沟侵蚀是集流侵蚀的结果, 其形成和发展取决于一定的径流量和径流动能, 而上方汇水面积及坡度则决定了径流量和径流动能的大小<sup>[5]</sup>。因此, 浅沟侵蚀常发生于坡度较陡的坡面上, 而且一般多发生于具有一定汇水面积的坡面的中、下部。Begin, Vandaele 等<sup>[6-7]</sup>通过研究发现, 对于坡面汇流形成的浅沟来说,

收稿日期: 2010-04-27

修回日期: 2010-10-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵区发育活跃期切沟侵蚀过程研究”(40871137); 国家基础研究发展计划项目“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201)

作者简介: 丁晓斌(1983-), 男(汉族), 山西省定襄县人, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统与土壤侵蚀模型研究。E-mail: dxbsgh@gmail.com。

通信作者: 郑粉莉(1960-), 女(汉族), 陕西省蓝田县人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程与预报、侵蚀环境效应评价研究。

E-mail: flzh@m.s.iswc.ac.cn.

浅沟上方坡面的坡度  $S$  和单位汇水面积  $A$  之间存在明显的负相关关系, 浅沟侵蚀发生的临界关系可以用幂函数  $S \times A^b = a$  表示。在此基础上, 各国学者基于各自研究区域的地形及侵蚀特点, 建立了不同地区的浅沟侵蚀临界模型(表 1)<sup>[7-9]</sup>。而国内在这一方面的研究还相对薄弱, 张科利等<sup>[10]</sup>对黄土丘陵沟壑区坡面浅沟侵蚀发育的特征值进行了研究, 发现临界坡长、浅沟分布间距和临界汇水面积与坡面平均坡度呈二次曲线关系。胡刚等<sup>[11]</sup>和李斌兵等<sup>[12]</sup>分别建立了东北漫川漫岗黑土区以及黄土高原丘陵沟壑区的浅沟侵蚀临界模型。本文基于子午岭地区高精度 GPS (Trimble 5700) 实测的梁坡地形数据和建立的高分辨率 DEM, 借助 GIS 数据分析处理方法, 对国内外浅沟侵蚀临界模型进行了验证。最后, 通过 GPS 实测的梁坡地形数据, 建立适用于子午岭地区坡面浅沟侵蚀区临界模型, 以期促进坡面浅沟侵蚀的定量化研究, 并为侵蚀预报模型建立提供理论依据。

表 1 现有的浅沟侵蚀临界模型

临界模型	研究区域	模型表达式
Vandaele 模型 <sup>1</sup> [7]	比利时	$SA^{0.4} > 0.5$
Moore 模型 <sup>9</sup>	澳大利亚	$AS > 18$
Vandaele 模型 <sup>2</sup> [7]	葡萄牙	$S > 0.025(A/10000)^{-0.4}$
Desmet & Gover 模型 <sup>8</sup>	比利时	$SA^{0.4} > 0.72$
张科利模型 <sup>10</sup>	安塞县南沟	$A = 2974 - 175.38S + 3.44S^2$
李斌兵模型 <sup>12</sup>	安塞纸坊沟	$SA^{0.1045} > 0.5227$

注:  $S$  为地面坡度(m/m);  $A$  为单位汇水面积(m<sup>2</sup>/m)。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省富县子午岭地区任家台林场所辖梁坡地块, 其地理位置为东经 109° 11', 北纬

36° 05', 海拔 920~ 1 683 m。该地区地处暖温带北缘部位, 由于受大陆东亚季风气候影响, 降雨量年际变化较大, 年内分配不均, 一年内干湿季节交替。区内年均气温 9 °C, 年均降水量 576.7 mm, 其中大约有 60% 以上的降水集中于 7—9 这 3 个月, 且多为短历时暴雨。该区林地被开垦后, 土壤侵蚀急剧加重。不同地形部位上, 开垦裸露地的土壤侵蚀量达 7 830~ 24 400 t / (km<sup>2</sup> · a)。土壤侵蚀以细沟侵蚀和浅沟侵蚀为主, 细沟、浅沟侵蚀量占总侵蚀量的 68.3% ~ 91%, 土壤侵蚀量随降水量的变化而年内分布不均, 其中以 6—8 月的侵蚀量最多, 占全年侵蚀量的 65% 以上, 最大可达 99.9%<sup>[13]</sup>。多期高精度 GPS 数据生成的 DEM 显示, 该区梁坡浅沟侵蚀分布区的面积约占梁坡总面积的 55% ~ 65%。该区的浅沟分布密度与周边地区类同(见表 2)<sup>[14]</sup>。表 2 表明, 对于 20~ 50 条/km<sup>2</sup> 的浅沟分布密度, 子午岭地区与周边地区基本类似, 其值略大于延安—安塞一带, 而略小于白于山, 因而, 子午岭地区浅沟侵蚀特征具有较好的代表性。

### 1.2 高精度 GPS 地形测量与数据处理

本研究于 2007 年 8 月至 2008 年 9 月间 3 次在野外利用高精度 GPS (Trimble 5700) 的实时动态测量(RTK)方式获取坡面地形信息。测量时为了更好地进行后期数据处理, 对研究坡面小区的边界进行了加测, 减少边界效应的影响; 同时, 为了充分反映坡面沟蚀形态的空间分布, 测量时对沟壁沟槽部位进行了加密测量。每次测量获取约 1 500 个数据, 共获取地形数据点 5 000 余个。后期处理时选用 Trimble Geomatics Office (TGO) 软件对数据进行初步验证<sup>[15-16]</sup>, 并通过 ArcGIS 软件提供的地统计插值方法生成高精度的数字高程模型(DEM), 为坡面浅沟侵蚀模型的建立提供基础地形数据。

表 2 子午岭地区(富县)与周边地区坡面浅沟分布密度所占比例对比

研究区	浅沟分布密度/(条 · km <sup>-2</sup> )					%
	< 20	20~ 30	30~ 40	40~ 50	> 50	
纸坊沟(安塞)	19.0	41.0	30.0	6.6	3.4	77.6
县南沟(安塞)	16.0	38.6	31.8	7.2	6.4	77.6
子午岭地区(富县)	16.2	23.9	45.1	11.2	3.6	80.2
延安市	14.0	36.6	32.1	10.7	6.6	79.4
白于山	9.0	31.8	40.9	13.6	4.7	86.3
志丹县	17.0	39.0	28.9	8.8	6.3	76.7

### 1.3 坡面地形与水文分析

汇水面积是流经某点或某一段等高线上方所有地形的投影面积, 单位汇水面积是单位长度等高线上方的汇水面积, 可以定义为某段等高线上方单位汇水面积  $A$  与等高线长度  $L$  的比率。用栅格 DEM 计算单位汇水面积时, 等高线长度可以用栅格单元的边长

近似表示。因此, 单位汇水面积就可以简单地通过流向栅格单元的栅格数进行计算<sup>[17]</sup>。本文基于高精度 GPS (Trimble 5700) 实测的梁坡坡面地形数据, 在 ArcGIS 平台下, 首先经过地统计分析方法插值生成高分辨率的 DEM (0.5 m × 0.5 m), 进而通过一系列的坡面地形分析和水文分析得到研究坡面每个栅格

的坡度信息以及栅格上游的汇水面积。

1.3.1 坡度分析 目前,利用 DEM 提取地面坡度的算法主要有 5 种:四块法、空间矢量分析法、拟合平面法、拟合曲面法<sup>[18]</sup>、直接算法,其中,拟合曲面法计算结果较好,使用最为广泛。本文就是采用拟合曲面法提取地面坡度信息的。

1.3.2 坡面流向分析 水流方向的确定是运用 DEM 进行水文分析计算汇水面积的基础,对于每个栅格单元,水流方向是指水流离开此格网时的指向。本文使用单流向算法中的 D8 算法进行流向分析。D8 法用最陡坡度法来确定水流的方向,即在  $3 \times 3$  的 DEM 栅格窗口上,计算中心栅格与各相邻栅格间的距离权落差(即栅格中心点落差除以栅格中心点之间的距离),取距离权落差最大的栅格为中心栅格的流出栅格。距离权落差是指中心栅格与领域栅格的高程差除以两栅格间的距离,其算法为:

$$S = Az/D$$

式中:  $Az$  —— 2 个格网单元之间的高程差;  $D$  —— 2 个格网单元中心之间的距离<sup>[19]</sup>。

1.3.3 汇流分析 汇流分析的主要目的是确定流路。在流向栅格图的基础上生成汇流栅格图,栅格图中每个栅格单元的值代表上方汇水区流入该栅格单元的栅格总数,即汇入该栅格单元的流入路径数(NIP)。经过进一步的计算即可得到栅格单元上方的汇水面积。

## 2 结果与分析

### 2.1 已有浅沟侵蚀临界模型提取坡面浅沟侵蚀区的对比

在 GPS 实测数据生成的梁坡高分辨率 DEM 的基础上,将已有的浅沟侵蚀临界模型应用于子午岭地区,得到不同浅沟侵蚀临界模型提取的坡面浅沟侵蚀分布图(图 1),并将提取结果与实际坡面浅沟侵蚀区进行对比(表 3)。

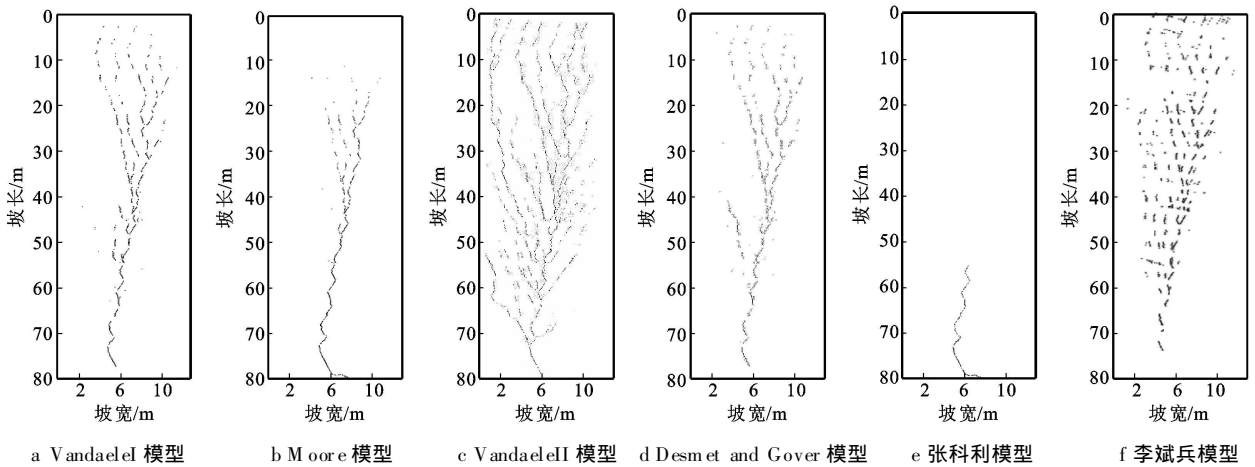


图 1 现有浅沟侵蚀模型提取的梁坡浅沟侵蚀区

表 3 几种浅沟临界模型提取结果的对比

临界模型	模型表达式	浅沟侵蚀区面积/ $m^2$	占梁坡总面积百分比/%
Vandaele 模型 1 <sup>[7]</sup>	$SA^{0.4} > 0.5$	959.70	90
Moore 模型 <sup>[9]</sup>	$AS > 18$	746.20	70
Vandaele 模型 2 <sup>[7]</sup>	$S > 0.025(A/10000)^{-0.4}$	1 034.02	95
Desmet & Gover 模型 <sup>[8]</sup>	$SA^{0.4} > 0.72$	959.70	90
张科利模型 <sup>[10]</sup>	$S = 2974 - 175.38S + 3.44S^2$	319.80	30
李斌兵模型 <sup>[12]</sup>	$SA^{0.1045} > 0.5227$	959.70	90

注:  $S$  为地面坡度( $m/m$ );  $A$  为单位汇水面积( $m^2/m$ )。

基于我们在野外 2007—2008 实测的三期高精度 GPS 地形数据,生成研究区高分辨率的 DEM ( $0.5 m \times 0.5 m$ ),得到浅沟侵蚀区分布面积约占坡面总面积的 55%~65%。从图 1 和表 2 可知,Vandaele 模型、

Moore 模型、Desmet 和 Gover 模型以及李斌兵模型预测的浅沟侵蚀区面积明显大于实际浅沟侵蚀区的面积的 10%~40%,而张科利模型所预测的浅沟侵蚀区却小于实际浅沟侵蚀区的 25%~35%。已有的浅

沟侵蚀临界模型预测结果在子午岭地区出现偏差, 主要是由研究区坡度和降雨条件的差异造成的。Vandaele 模型是在比利时和葡萄牙等地的研究区域得到的, 区域范围内坡面坡度最大不超过  $20^\circ$ , Desmet 和 Gover 模型是在比利时研究所得, 研究区内平均坡度大约为  $4^\circ$ , 最大坡度约为  $8^\circ$ , Moore 模型是在澳大利亚新南威尔士小流域研究数据基础上获得的, 研究区域平均坡度约为  $7^\circ$ , 而子午岭地区坡面坡度一般都大于  $20^\circ$ , 其次, 子午岭地区多为短历时暴雨, 从而导致预测结果偏大。张科利模型是在黄土高原县南沟调查资料研究基础上得到的, 李斌兵模型是在纸坊沟 GPS 实测数据基础上获得, 二者研究区域坡度与子午岭地区坡度相差不大, 但由于降雨条件不同, 子午岭地区年内侵蚀性降雨次数明显偏多, 从而使得模型预测结果出现偏差。1990—2009 我们野外观测站资料表明, 子午岭地区富县每年观测到的侵蚀性降雨平均为 7~13 次, 而安塞侵蚀性降雨仅为 3~5 次。野外浅沟分布密度量测资料也表明, 子午岭地区富县坡面浅沟分布密度略大于安塞—延安一带, 如 20~50 条/ $\text{km}^2$  的浅沟分布密度, 子午岭地区(富县)为 80.2%, 而安塞—延安一带为 77.6%~79.4%(表 2)。

综上所述, 由于子午岭地区地形地貌比较特殊, 以及降雨条件的差异, 现有的浅沟侵蚀区临界模型大多不能准确预测坡面浅沟侵蚀分布区具体位置。因此, 必须建立适用于子午岭地区的浅沟侵蚀临界模型。

### 2.2 子午岭地区浅沟侵蚀临界模型的建立

基于梁坡 2007 年 7 月和 10 月两期高精度的 GPS 实测数据, 通过地统计分析方法插值生成高分辨率的坡面 DEM ( $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ )。选取 47 个浅沟重要特征点, 如沟头、沟道转折点等, 记录它们的坐标值, 然后将这些点落在 DEM 图上, 再通过空间分析和栅格计算, 获取特征点的单位汇水面积和坡度值。将单位汇水面积  $A$  与坡度  $S$  绘于双对数坐标中(图 2), 发现研究区浅沟上方的单位汇水面积  $A$  和坡度  $S$  呈明显的负相关关系, 并且可以用幂函数来表示; 对其进行统计回归分析可以得到浅沟侵蚀临界模型  $S \times A^{0.4334} > 2.2434 (R^2 = 0.4334^{**}, n = 47)$ 。

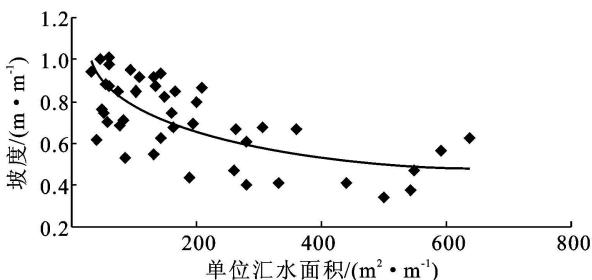


图 2 子午岭地区坡面单位汇水面积和坡度关系

### 2.3 浅沟侵蚀临界模型的验证

利用 2008 年 7 月的 GPS 实测梁坡地形数据对浅沟侵蚀临界模型进行验证(图 3), 发现浅沟大约在坡面的 50 m 处开始出现, 浅沟侵蚀区面积约占坡面总面积的 60%, 与该梁坡实际浅沟侵蚀区占整个坡面的 57%, 相对误差仅为 5%。说明本研究得出的浅沟侵蚀临界模型可以满足子午岭地区坡面土壤侵蚀定量研究的需要。

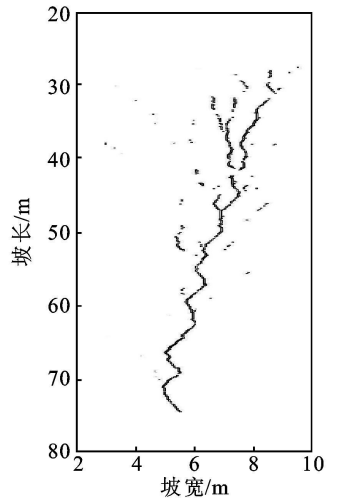


图 3 浅沟侵蚀临界模型验证

### 3 结论

本文首先在 GPS 实测的梁坡地形数据的基础上, 借助 GIS 平台, 对国内外的浅沟侵蚀临界模型进行了验证, 并通过回归分析得到了子午岭地区坡面浅沟侵蚀临界模型, 所得结论如下。

(1) 由于地形地貌以及降雨条件的差异, 国内外已有的浅沟侵蚀临界

模型不能用于界定子午岭地区梁坡浅沟侵蚀分布区。

(2) 子午岭地区坡面浅沟上方的单位汇水面积  $A$  和坡度  $S$  之间呈明显的负相关关系, 浅沟侵蚀临界模型式为:  $SA^{0.4334} > 2.2434$ 。

(3) 用所建浅沟临界模型模拟的梁坡浅沟侵蚀分布面积与实际非常吻合, 精确度达 95%。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 唐克丽, 郑世清, 席道勤, 等. 杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治[J]. 水土保持通报, 1983, 3(5): 43-48.  
 [2] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型[J]. 地理科学, 1984, 4(4): 321-327.  
 [3] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究, 1991(4): 39-45.  
 [4] 郑莉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 陕西西安: 陕西人民出版社, 2000: 96-119.  
 [5] Desmet P J J, Poesen J, Govers G, et al. Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies [J]. Catena, 1999, 37: 377-3921.

(下转第 201 页)

- [2] 范玮熠, 王孝安, 郭华. 黄土高原子午岭植物群落演替系列分析[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 706-714.
- [3] 田晶会, 王百田. 黄土半干旱区刺槐林水分与生长关系研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 61-64.
- [4] 李鹏, 李占斌. 渭北黄土高原不同立地上刺槐根系分布特征研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 15-19.
- [5] 杨建伟, 梁宗锁. 不同土壤水分状况对刺槐的生长及水分利用特征的影响[J]. 林业科学, 2004, 40(5): 93-98.
- [6] 朱雨行. 刺槐尺蠖防治指标的研究[J]. 中国森林病虫, 2007, 26(2): 14-19.
- [7] 张川红, 郑勇奇, 刘宁, 等. 刺槐对乡土植被的入侵与影响[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 18-23.
- [8] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [9] Ricotta C, Avena G, Chiarucci A. An index of divergence from species to life-form diversity based on the notion of intrinsic diversity ordering[J]. *Plant Ecology*, 2002, 165: 217-222.
- [10] Mishra B P, Tripathi O P, Tripathi R S, et al. Effects of anthropogenic disturbance on plant diversity and community structure of a sacred grove in Meghalaya, northeast India[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2004, 13: 421-436.
- [11] 李俊清. 森林生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 285-299.
- [12] 毛志宏, 朱教君. 干扰对植物群落物种组成及多样性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2695-2701.
- [13] 刘江华, 刘国彬, 侯禧禄, 等. 刺槐林地土壤水分与林下植物群落生物量的关系[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 43-48.
- [14] 张超, 刘国彬, 薛楚, 等. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤抗蚀性演变特征[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 1-7.
- [15] 王永健, 陶建平, 张炜银. 茂县土地岭植被恢复过程中物种多样性动态特征[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1028-1036.
- [16] 秦伟, 朱清科, 刘中奇, 等. 黄土丘陵沟壑区对耕地植被恢复自然演替系列及其植物物种多样性特征[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 507-513.
- [17] 李苗, 李凯荣, 杨晓毅, 等. 淳化县人工油松林林分结构及林下植物多样性研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 142-147.
- [18] 刘彦, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京密云水库集水区刺槐人工林空间结构分析[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 25-28.
- [19] 刘建利, 李凯荣, 易亮, 等. 黄土高原丘陵区人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[J]. 水土保持通报, 2004, 28(3): 49-70.
- (上接第125页)
- [6] Begin Z B, Schumm S A. Instability of alluvial valley floors: a method for its assessment [J]. *Trans. ASAE*, 1979, 22: 347-350.
- [7] Vandaele K, Poesen J, Govers G, et al. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision [J]. *Geomorphology*, 1996, 16: 161-173.
- [8] Desmet P J J, Govers G. Two-dimensional modeling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography [J]. *Catena*, 1997, 29: 283-306.
- [9] 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 ASAE*, 1988, 31(4): 1098-1177.
- [10] 张科利, 唐克丽, 王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 8-13.
- [11] 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.
- [12] 李斌兵, 郑粉莉, 张鹏, 等. 黄土高原丘陵沟壑区小流域浅沟和切沟侵蚀区的界定[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 16-20.
- [13] 郑粉莉, 唐克丽, 白红英, 等. 子午岭地区不同地形部位开垦裸露地降雨侵蚀力的研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(1): 26-32.
- [14] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420-427.
- [15] 张鹏, 郑粉莉, 陈吉强, 等. 利用高精度 GPS 动态监测沟蚀发育过程[J]. 热带地理, 2009, 29(4): 368-373, 406.
- [16] 张鹏, 郑粉莉, 王彬, 等. 高精度 GPS 三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 11-15.
- [17] Gallant J C, Wilson J P. Primary Topographic Attributes [M] // Wilson J P, Gallant J C. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: Wiley, 2000: 51-86.
- [18] 汤国安, 陈正江, 赵牡丹, 等. ArcView 地理信息系统空间分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 140-185.
- [19] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984, 28: 323-344.