

# 浅沟侵蚀过程及预报模型研究进展

武 敏<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨陵 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 杨陵 712100)

**摘要:** 浅沟是黄土丘陵沟壑区的重要产沙方式之一, 是在径流冲刷和人类耕作共同作用下形成的。介绍了浅沟侵蚀发生发展过程、浅沟水流水力学特性、浅沟侵蚀影响因素、浅沟侵蚀预报模型等进展, 提出了今后亟待加强的研究领域, 包括浅沟发生的临界动力条件、浅沟发育过程的定量描述、浅沟水流的剥离方程及泥沙搬运能力、动态监测浅沟侵蚀过程的新方法、包括浅沟侵蚀的坡面土壤流失预报模型等。

**关键词:** 浅沟; 侵蚀过程; 模型; 加强的研究领域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)04-0113-04

## Research Progress on Ephemeral Gully Erosion Process and Its Prediction Model

WU Min<sup>1,2</sup>, ZHENG Fen-li<sup>1,2</sup>

(1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Resource and Environment, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Ephemeral gully is one of the important soil erosion patterns at hilly-gully region of the Loess Plateau. Its initiation and development is closely related to runoff scouring and human farming. The authors outlined ephemeral gully process, hydraulic characteristics of ephemeral gully flow, affecting factors and prediction models of ephemeral gully erosion. Strengthening research fields of ephemeral gully erosion are proposed, including critically dynamic parameters, qualifying ephemeral gully erosion process, detachment equation by shallow gully flow, transport capacity of shallow gully flow, soil loss predicting model related shallow gully and new methods for monitoring shallow gully process.

**Key words:** ephemeral gully; erosion process; model; strengthening research fields

浅沟侵蚀是发生在陡坡耕地上一种重要的线状侵蚀方式, 是在径流冲刷和人为耕作共同作用下形成的一种侵蚀形态, 浅沟侵蚀发生发展过程的研究不但可以加深对土壤侵蚀规律的认识, 而且也能为科学地评价人为耕作活动对侵蚀过程的影响提供重要的科学依据, 同时浅沟侵蚀预报模型的建立将为坡面水土保持措施配置提供科学支持。

### 1 浅沟侵蚀的概念

浅沟侵蚀是细沟侵蚀向切沟侵蚀演化的一种过渡侵蚀类型。朱显谟<sup>[1]</sup>早在 1956 年土壤侵蚀分类中将现代沟蚀分为细沟侵蚀、浅沟侵蚀和切沟侵蚀, 他认为浅沟由细沟演变而来, 能发展为切沟, 浅沟是沟蚀的过渡形态, 能横向耕作, 但不能消灭它的痕迹。刘元保<sup>[2]</sup>从侵蚀沟的演化系列考虑, 强度浅沟

使指暴雨径流冲刷槽形地后, 在其底部所形成的侵蚀沟槽。唐克丽<sup>[3]</sup>指出, 浅沟由坡耕地上主细沟发展形成, 其横断面因不断的再侵蚀和再耕作呈弧形扩展, 无明显的沟缘, 在黄土丘陵区, 浅沟的深度均大于耕层厚度, 一般约为 20~30 cm, 也有超过 50 cm 的, 在南方花岗岩风化壳丘陵斜坡上, 也可见到浅沟, 其宽度约 1 m, 深度可超过 0.5 m。

美国学者<sup>[4]</sup>20 世纪 80 年代以来提出一种新的侵蚀类型——临时性切沟, 自此将沟蚀分为细沟侵蚀、临时性切沟侵蚀和切沟侵蚀, 认为临时性切沟每次侵蚀的宽度和深度大于细沟, 但小于固定切沟, 不妨碍耕作, 但不能消除其痕迹。随着年复一年耕作与侵蚀的交替, 临时性切沟侵蚀可发展为固定切沟侵蚀。由此可见, 国外的临时性切沟与我国的切沟指的是同一种侵蚀类型(图 1)。

<sup>1</sup> 收稿日期: 2004-07-10

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX3-SW-422); 国家自然科学基金重点项目(40335050)

作者简介: 武敏(1977-), 男(汉族), 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀过程与预报。



图 1 浅沟形态与分布

## 2 浅沟侵蚀在坡面侵蚀中的地位

浅沟侵蚀是坡耕地土壤侵蚀的主要方式之一。浅沟的发生发展,使原来平整的坡面成为瓦背状地形,形成的一系列新倾斜面,增大了坡面起伏,使雨滴和径流与坡面的侵蚀接触面积的增加,使侵蚀作用加强,将引起更大的侵蚀量。坡面瓦背状地形的形成,导致坡面泥沙通过横向溢流进入浅沟沟槽,使坡面输沙能力增大。中国科学院在延河支流杏子河流域的考察资料<sup>[5]</sup>和陈永宗的调查资料<sup>[6]</sup>表明,浅沟分布面积占沟间地总面积的 78%。在浅沟分布密度较大的地区其侵蚀量占坡面总侵蚀量的 50%~80%。张科利等<sup>[7]</sup>通过小区试验对黄土坡面的产沙分配规律进行了研究,得出浅沟侵蚀带侵蚀量约占沟间地侵蚀量 70%。郑粉莉<sup>[8]</sup>通过对野外大型自然坡面径流场观测资料表明,浅沟侵蚀带的侵蚀产沙量占梁崩整个坡面侵蚀产沙量的 52.1%~64.1%。坡面浅沟侵蚀区的侵蚀量主要来自浅沟沟槽发展形成的浅沟侵蚀量,其占坡面总侵蚀量的 46%~91%,取决于浅沟发育程度。Casali<sup>[9]</sup>等指出在活跃侵蚀区浅沟侵蚀量占总侵蚀量的 30%,最大可达到 100%。Grissinger 和 Murphey<sup>[10]</sup>指出在密西西比河北部的一个小流域浅沟侵蚀量占总侵蚀量的 60%以上,两年以后的平均侵蚀量约为 2.10 kg/(m<sup>2</sup>·a)。美国 19 个州的调查资料<sup>[11]</sup>表明临时切沟侵蚀量占总侵蚀量的比例从纽约州的 17%到华盛顿州的 73%。所有这些研究都表明浅沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的比重较大,浅沟侵蚀在坡面侵蚀中占有重要的地位。

## 3 浅沟侵蚀发生发展过程

浅沟侵蚀的形成是在径流冲刷和人类耕作共同作用下由主细沟不断演化而来的。据郑粉莉<sup>[12]</sup>和张科利<sup>[13]</sup>的研究,坡面形成细沟后,径流相对集中于细沟槽,冲刷动能增大,促使细沟进一步发展。随着侵蚀过程的继续,上下不同部位的细沟发生合并,形成了更大的细沟,称之为主细沟。耕作之后,细沟形态消失了,但细沟发生的部位表面形态已有改变,在下次暴雨时,在主细沟发生的地方,便可汇集较上一次更多的径流,冲走更多的土壤,使细沟间的差异更大。冲刷-耕作-冲刷如此不断循环,径流汇集面积日益增大,再次发生暴雨时,便能吸收更大范围内的径流汇集,形成浅沟股流继而发生浅沟侵蚀。浅沟的发生发展过程包括浅沟沟头溯源侵蚀、浅沟水流对浅沟沟槽的冲刷以及浅沟沟壁的崩塌。径

流初始时,在其流路上形成一系列跌水,继而出现下切沟头,沟头的上溯下延形成浅沟沟槽,由于沟槽的袭夺作用,使浅沟间的水流汇入浅沟沟槽,水流对沟槽具有更大的冲刷力,在沟槽内再次出现下切沟头,使浅沟迅速加深,沟壁的崩塌使浅沟沟槽不断加宽。

## 4 浅沟水流水力学特征

坡面水流是土壤侵蚀及产沙的主要动力因素,研究坡面水流水动力学特性,将有助于从动力学角度深入认识坡面产沙及侵蚀演变过程的本质原因,进而为建立水土流失预报模型奠定基础。雷阿林等<sup>[14]</sup>经过室内模拟试验指出:浅沟流的流量为出现细沟流量的 5~6 倍,流速为细沟 2~3 倍,  $Re \geq 7000$ ,为细沟 5 倍左右,弗罗德数为细沟 1~2 倍,离散性较大,但其值大于 1,阻力系数反而变化很小,在流量相同的情况下,浅沟流动能的增量为细沟流的 1.57 倍。浅沟流属于急紊流,比细沟具有更大的水流能量、更强的紊动性,因而侵蚀强度也更大,浅沟流单位流量的平均含沙量为细沟流的 1.5 倍。近期郑粉莉等的研究表明,浅沟水流的剥离率是片蚀的 3~4 倍,是细沟侵蚀的 1.5~3 倍;浅沟水流是紊流范围,其流态为急流。

## 5 浅沟侵蚀影响因素

### 5.1 上方来水来沙对浅沟侵蚀过程的影响

浅沟上方来水来沙对浅沟侵蚀产沙重要影响。郑粉莉等<sup>[8]</sup>通过布设大型自然坡面径流场,研究坡上方来水来沙对浅沟侵蚀区侵蚀过程的影响,表明次降雨条件下,坡上方来水使浅沟侵蚀带的侵蚀量增加 12%~84%;年平均增加 38%~66%。并引用增水系数和增沙系数概念,分析了上方来水对下方浅沟侵蚀带侵蚀产沙的影响。结果表明,增沙系数与增水系数呈正相关,增沙系数与上方汇水含沙量呈负相关;同时指出当下垫面浅沟沟槽处翻耕层过程中,由于耕层的土壤抗侵蚀力弱,上方汇水使浅沟发育迅速,因而增沙系数较大,当下垫面浅沟沟槽处犁底层出露后,由于该层有较强的抗冲性,发育速度减慢,水流侵蚀的物质较少,因而增沙系数较小。为了进一步研究上方来水增加下方浅沟侵蚀过程的影响机理,郑粉莉等<sup>[8]</sup>(2000)设计室内双土槽径流小区,利用模拟降雨试验研究了陡坡地(20°)上方来水来沙对坡下方有浅沟侵蚀带和无浅沟侵蚀带的影响。研究表明,上方侵蚀带的来水来沙对浅沟侵蚀带侵蚀产沙量产生重要的影响,

在相同坡上方来水条件下, 上方来沙强度的减少, 使浅沟侵蚀带的侵蚀产沙量增加。上方来水引起的侵蚀产沙量随降雨强度的增加而增大, 其增加幅度为 4.4%~83.5%。上方来水来沙对浅沟侵蚀带的影响受上方来水含沙量、降雨强度、坡面坡度和土壤表面条件的影响。坡面汇流汇沙对坡面浅沟侵蚀产生重要影响, 1 L/min 的上方汇流可引起单位长度浅沟剥离率达 0.1~0.3 kg/(m·min)。

上方来水来沙对浅沟径流流速和径流含沙量产生重大影响。郑粉莉等<sup>[8]</sup>上方来水使浅沟沟坡径流流速增大, 较无上方来水时增大 12%~24%, 尤其是上方来水使浅沟沟槽径流流速的大幅度增加, 浅沟沟槽流速增大 45.6%~58.4%。上方来水使浅沟土槽的径流含沙量较无上方来水时的含沙量增大的幅度为 5.4%~287.4%, 增大幅度随着降雨强度的增大, 含沙量幅度有减小的趋势。

## 5.2 降雨径流因子对浅沟侵蚀过程的影响

降雨对浅沟侵蚀的影响主要体现在降雨强度、降雨量等方面。张科利<sup>[3]</sup>通过野外小区观测资料指出: 浅沟侵蚀基本上与降雨量关系不明显, 浅沟侵蚀主要受降雨强度的影响, 当模拟降雨试验的降雨强度由 1.31 mm/min 增大到 3.52 mm/min 时, 在降雨量大体相当的情况下, 每毫米降雨的侵蚀量由 0.543 kg 增加到 2.626 kg。雨强大了 2.687 倍, 而浅沟侵蚀量却增大了 4.836 倍。

## 5.3 地形因子

在黄土高原地区, 影响水力侵蚀的地形因子主要包括地形的坡度、坡长、坡向及坡型。地形直接决定着径流是否集中以及集中的部位, 直接影响着浅沟的发生、分布部位、以及浅沟侵蚀的发生程度。地形因子对浅沟侵蚀的影响主要体现在坡度、坡长和坡形等特征与浅沟侵蚀的关系上。

### 5.3.1 坡度

坡度影响坡面的受雨面积及其雨量, 从而影响坡面径流、入渗和径流动能的大小。临界坡度是临界动能的具体体现之一。张科利<sup>[3]</sup>指出浅沟发生的临界坡度: 18.2°, 以 22~31°分布居多。另一方面, 坡度越大, 坡面物质稳定性就越差, 越容易发生浅沟侵蚀。在黄土丘陵区, 在坡的上部, 坡度较缓, 一般只发生片蚀和细沟侵蚀。顺坡向下, 坡度渐增, 便发生浅沟侵蚀且形成浅沟。在陕北、晋西因梁峁坡面较短, 浅沟一般分布在梁峁坡面的中下部<sup>[15~21]</sup>。坡度影响浅沟侵蚀的强弱, 张科利<sup>[3]</sup>在一定范围内随坡度增大而增加。同时, 坡度影响浅沟侵蚀的分布, 陈永宗发现<sup>[9]</sup>, 在 5~30°的坡面上, 浅沟条数随坡度的增大而增多, 在 30~45°的坡面上随坡度的增大而减小。张科利发现<sup>[13]</sup>, 坡度由小变大, 分布间距和分水距由大变小再变大。

### 5.3.2 坡长

坡长影响汇集过程、径流量的多少, 决定着浅沟侵蚀的发生, 张科利<sup>[13]</sup>指出浅沟侵蚀的发生要求有一定的临界坡长。其特征值变化于 20~60 m, 平均为 40 m 左右。坡长的大小决定着浅沟汇水面积的大小, 影响着侵蚀量的多少。张科利<sup>[2]</sup>指出由于浅沟已有了固定形态, 浅沟侵蚀发生的临界汇水面积就等于发生浅沟侵蚀的临界坡长与间距的乘积, 其特征值为 300~1 200 m<sup>2</sup>, 以 400~800 m<sup>2</sup> 之间居多, 平均为 657 m<sup>2</sup>。就某一条浅沟而言, 在一定坡长范围内侵蚀量随坡长的增加而增加, 但在一定程度后, 由于泥沙负荷的增加, 径流挟沙力减小, 浅沟侵蚀量减小。

## 5.3.3 坡形

坡形是坡度和坡长的组合形态, 由于坡度和坡长的多变化, 天然坡形是多种多样的。从一个完整坡面来看, 坡形可概括为直形坡、凸形坡、凹形坡、凸凹形坡和台阶形坡。坡形决定着径流的汇集方式和过程, 进而影响浅沟的分布形式和分布密度受坡形的影响在直形坡形成平行排列的浅沟, 在凹形坡形成辐聚状浅沟, 在凸形坡形成辐散状。不同坡面浅沟的分布密度不同: 凹-凹坡>直一直坡>凸-凸坡, 且变化于 10~60 km/km<sup>2</sup>, 集中于 15~40 km/km<sup>2</sup>。坡形影响着侵蚀量, 唐克丽<sup>[3]</sup>的杏子河不同地形部位与不同利用状况下坡耕地的侵蚀量资料表明: 凸凹形坡与凹形坡上的土壤流失量均高于直形坡的原因是凸凹形坡与凹形坡易发生浅沟侵蚀, 而直形坡一般尚无形成浅沟侵蚀, 在其他条件形相同的情况下, 凸凹形地块的侵蚀量较凹形坡地块的侵蚀量增加了一倍, 其中浅沟侵蚀量为总侵蚀量的 86.7%。

## 5.4 地植被

雨滴击溅和径流冲刷是水土流失的动力, 植被覆盖可以通过削弱雨滴击溅、增加入渗和增强土壤抗冲性等方面的作用而大大减少浅沟侵蚀。张科利<sup>[3]</sup>通过人工模拟试验指出: 种草浅沟的侵蚀量要比裸露时减少 96.6%, 野外调查发现: 已经发育浅沟的坡面一经丢荒后, 因浅沟底部生草的原因而抑制浅沟侵蚀的发生。郑粉莉<sup>[8]</sup>通过在子午岭调查测算指出: 人为破坏植被的开垦地, 梁峁坡的浅沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的 47%~72%。

## 5.5 下垫面侵蚀状况

下垫面侵蚀发育状况直接关系着侵蚀产沙量, 进而影响着增沙系数。郑粉莉<sup>[14]</sup>经过试验研究指出: 在上方来水含沙量和降雨特征值相同时, 随着上方来水量和增水系数的增大, 增沙系数反而减小。在野外调查<sup>[8]</sup>指出: 下垫面细沟特别是浅沟的深度和宽度较小时, 在上方来水的冲刷下, 浅沟的深度和宽度发展较快, 增沙系数增加 67.1%, 而在下垫面细沟浅沟发育已基本趋于稳定时, 尽管来水量和增水系数较大, 增沙系数反而才增加 37.5%。

## 6 浅沟侵蚀预报模型

坡面侵蚀预报模型的研究可加深土壤侵蚀过程及其机理的认识, 推动土壤侵蚀学科发展, 同时也可可为坡面水土保持措施配置提供科学支持。

Thorne(1984)<sup>[4]</sup>指出浅沟侵蚀预报形式:

$$E = a[E_r K_r (U - U_c)] C_r$$

式中: E——浅沟侵蚀; a——系数; E<sub>r</sub>——径流侵蚀力因子; K<sub>r</sub>——土壤可蚀性因子; U——易发生浅沟侵蚀面积的参数; U<sub>c</sub>——临界面积; C<sub>r</sub>——覆盖管理因子。

浅沟侵蚀预报模型(EGEM- Ephemeral Gully Erosion Model)<sup>[22]</sup>是美国农业部农业研究局和土壤保持局共同研发的预报单条浅沟年平均土壤侵蚀量的模型。浅沟侵蚀模型(EGEM)由水文和侵蚀两个模块组成, 以一种非常简单的方式模拟浅沟的复杂时空变化, 可估算单条浅沟的一次暴雨或年平均土壤流失量。水文模块是基于径流曲线(curve number)数的一个物理过程模型; 为了计算浅沟的最终宽度和深度, 侵蚀模块使用水文模型输出的结果, 以解决经验关系和物理过程方程的结合。在模型中, 假设有一有径流就出现峰值流量, 峰值流量和径流总量决定侵蚀, 同时, 假定沿沟长

方向沟深是固定的,并假定沟将垂直向下侵蚀直至达到可蚀性较差的犁底层。由于深度大于 46 cm 的沟被认为是传统切沟而不是浅沟,因此,沟的最大容许深度是 46 cm。当达到最大深度时沟将加宽。模型在模拟前必须确定估算深度和最终沟长。

Nachtergaele 等<sup>[23]</sup>在地中海环境下对模型进行了测试,评价地中海环境中 EGEM 预报浅沟侵蚀量的适宜性。他们分别在西班牙东南部(Guadalein basin 研究区)和葡萄牙东南部(Alentjo 研究区)共收集了 86 条浅沟的 EGEM 输入数据系列,在使用 EGEM 输入参数估算的同时,还通过野外测量确定了每条浅沟的实际侵蚀量。他们发现预报浅沟体积和量测浅沟体积之间有很好的相关性( $R^2=0.88$ )。但预报浅沟横断面和量测浅沟横断面相关性差( $R^2=0.27$ )。最后得出结论,EGEM 不能预报地中海地区的浅沟侵蚀,浅沟长度是决定浅沟体积的关键参数,回归分析表明在浅沟长度和浅沟体积之间存在一种较高的相关性( $R^2=0.91$ ),因此浅沟长度的精确预报对于估算浅沟侵蚀率是至关重要的。

张科利等<sup>[24]</sup>从形态分析入手,探讨了浅沟侵蚀量的计

算模型:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n V_i D}{ST}$$

式中:  $M$ ——年平均浅沟侵蚀量( $t/km^2 \cdot a$ );  $V_i$ ——每段浅沟的体积( $m^3$ );  $D$ ——黄土容重( $t/m^3$ );  $T$ ——坡面开垦时间( $a$ );  $S$ ——平坡段总面积( $m^2$ )。通过采取定时测定浅沟形态,计算两次形态变化差值,来求算这一时段内坡面土壤侵蚀量。

综上所述,尽管在浅沟侵蚀发生发展过程、浅沟水力学特性、浅沟侵蚀影响因素、浅沟侵蚀预报模型等方面取得了一定的研究进展,但由于浅沟侵蚀过程的复杂性及浅沟形成过程受人为耕作活动影响的特殊性,目前对浅沟发生的临界动力条件、浅沟发育过程的定量描述、浅沟水流的剥离方程及泥沙搬运能力、包括浅沟侵蚀的坡面分布式土壤流失预报模型、动态监测浅沟侵蚀过程的新方法等研究还相对薄弱,有待今后进一步加强。

#### 参考文献:

- [1] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99- 115.
- [2] 刘元保, 朱显谟, 等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, 第 7 集: 9- 18.
- [3] 土壤保持与土壤保持词条[A]. 土壤侵蚀与水土保持农业大百科全书(土壤卷)[M]. 北京: 农业出版社, 1998.
- [4] Foster G R. Understanding ephemeral gully erosion[A]. In: Committee on Conservation Needs and Opportunities. Soil Conservation (Ed.). Assessing the National Resources Inventory[M]. Board on Agriculture. National Research Council. Washington. DC: National Academy Press, 1986. 90- 125.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000. 96- 119.
- [9] Casali J Bennett, S Robinson K. Processes of ephemeral gully erosion[J]. International Journal of Sediment Research, 2000, 15(1), 31- 41.
- [10] Grissinger E H. Murphey C E. 1989. Ephemeral gully erosion in the loess uplands, Goodwin Creek watershed, northern Mississippi[M]. Beijing: USA. Final Proc. Int. Conf. River Sedimentation. 1989. 51- 58.
- [11] Zheng Fenli. Huang Chi- hua. Gully erosion[A]. In: Lal Rattan edited. Encyclopedia of soil science[M]. New York: Marcel Dekker. Inc., 2002. 630- 634
- [12] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 黄土高原坡耕地的细沟侵蚀及其防治途径[D]. 陕西杨陵: 中国科学院西北水土保持研究所, 1983.
- [13] 张科利, 唐克丽. 陕北黄土丘陵沟壑区坡耕地浅沟及其防治途径[D]. 陕西杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1988.
- [14] 王文龙, 雷阿林, 等. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟动力机制研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 471- 475.
- [15] 李壁成. 小流域水土流失与综合治理遥感监测[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [16] 孟庆枚. 黄土高原水土保持[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996.
- [17] 唐克丽, 陈永宗. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及综合治理途径[M]. 北京: 中国科学技术出版社. 1990.
- [18] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报, 1987, (1): 36- 38.
- [19] 魏天兴. 晋西黄土残体系配置模式的研究[D]. 北京: 北京林业大学图书馆, 2000.
- [20] 陈永宗. 黄土高原现代侵蚀沟壁区防护林蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [21] 曹银真. 黄土地区梁坡的坡地特征与土壤侵蚀[J]. 地理研究, 1983, 2(3): 9- 27.
- [22] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. special Issue: soil erosion modeling at the catchments scale[J]. Catena, 1999, 37(3- 4): 393- 399.
- [23] Nachtergaele J, Poesen J, Vandekerckhove L, et al. Testing the Ephemeral Gully Erosion Model (EGEM) for two Mediterranean environments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(1): 17- 30.
- [24] 张科利, 唐克丽. 浅沟发育与陡坡开垦历史的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 9- 62.