

黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究

郑粉莉^{1,2}, 武 敏^{1,2}, 张玉斌^{1,3}, 丁晋利^{1,2}

(1. 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;
2 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100 3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 根据黄土陡坡地浅沟地形特征参数, 在室内人工建筑浅沟发育初期的雏形模型, 研究浅沟发育不同阶段沟头溯源侵蚀、沟壁扩张和沟槽下切变化规律, 分析浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献。结果表明, 浅沟发育不同阶段对应于不同的浅沟侵蚀过程。浅沟发育初期, 沟头溯源侵蚀、沟壁扩张和沟床下切均相对活跃, 且溯源侵蚀速率大于沟壁扩张速率和沟床下切速率; 浅沟发育中期, 以沟槽下切和沟壁扩张为主; 浅沟发育后期, 以沟壁扩张为主, 但沟壁扩张速率明显小于浅沟发育的初期和中期阶段。浅沟发育初期和中期阶段, 浅沟侵蚀量占总坡面侵蚀产沙的 58%; 浅沟发育后期, 浅沟侵蚀量占总坡面侵蚀产沙的 26%~59%。

关键词: 浅沟发育; 侵蚀过程; 黄土陡坡地; 模拟降雨试验

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2006)04-0438-05

浅沟侵蚀是坡面土壤侵蚀的一种重要侵蚀方式, 其发生发展在坡面土壤侵蚀中占有重要地位, 来自中国黄土高原^[1-4]、西班牙^[5,6]和美国^[7,8]的研究资料表明, 浅沟侵蚀占坡面侵蚀量的 17%~100%。由于浅沟侵蚀的重要性, 自 20 世纪 70 年代以来, 浅沟侵蚀受到国内外学者的高度关注, 并在浅沟侵蚀分布特征^[1,9,10]、浅沟侵蚀发生的地形临界^[9,11-15]、浅沟侵蚀过程及其影响因素^[14-23]等方面取得了新的研究进展, 建立了浅沟侵蚀预报模型^[24], 为浅沟侵蚀防治提供重要科学依据。由于浅沟侵蚀过程的复杂性, 有关浅沟侵蚀发生的临界动力条件、浅沟侵蚀搬运能力、浅沟侵蚀过程定量化等方面研究还很薄弱, 在浅沟发育不同阶段浅沟沟头溯源侵蚀、沟壁扩张和沟槽下切变化规律的研究基本上是空白, 严重地影响浅沟侵蚀过程模型及包括浅沟侵蚀的坡面侵蚀预报模型建立。本文切入目前浅沟侵蚀发育过程研究的薄弱环节, 以黄土陡坡耕地浅沟地形特征参数, 在室内人工建筑浅沟发育初期的雏形模型, 定量研究浅沟侵蚀过程, 分析浅沟发育不同阶段的沟头溯源侵蚀、沟壁扩张和沟槽下切的变化规律, 以期浅沟侵蚀过程定量研究和坡面土壤侵蚀预报模型的建立提供了科学

依据。

1 浅沟发育过程研究方法

浅沟侵蚀是在径流冲刷和人为耕作共同作用下形成的。黄土区的浅沟发育过程主要包括当年雨季前人为横向犁耕及当年雨季径流冲刷侵蚀过程。这里根据黄土丘陵区浅沟地形特征参数, 通过在室内人工建筑浅沟发育初期的雏形模型, 研究浅沟发育过程。

为了制作浅沟发育初期雏形模型, 设计了在长 6 m、宽 2 m、深 60 cm 的试验土槽。试验土槽填土时, 在土槽底部填 10 cm 细沙, 以保证良好的透水性。然后在沙层上填 40 cm 的安塞黄土。填土时将 50 cm 的土层分为耕层和犁底层, 其中耕层深度为 20 cm, 容重为 1.06~1.08 g/cm³, 犁底层深度为 30 cm, 容重在 1.25 g/cm³。填土时采用分层装土, 每次装土深度 5 cm, 以使下垫面土壤条件的变异性达到最小。试验土槽填土后, 根据浅沟发育初期形态, 在 6 m 长的试验土槽中, 从坡下至坡长 5 m 处, 制作浅沟雏形模型, 浅沟沟槽位于试验土槽中间, 浅沟沟底与两侧沟坡高差 12 cm, 浅沟雏形模型的横断面为弧形 (图 1)。

收稿日期: 2005-08-19 修订日期: 2005-12-23

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

作者简介: 郑粉莉 (1960-), 女, 陕西蓝田人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为土壤侵蚀过程、预报及侵蚀环境效应评价研究。E2 mail flh@ms.iswc.ac.cn

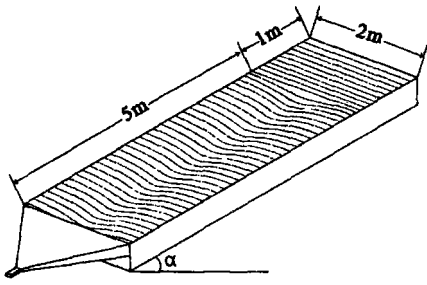


图 1 浅沟侵蚀试验模型示意图

Fig 1 Sketch of experimental study of ephemeral gully erosion

为了保证相对均匀的下界面条件及减少土壤表面的变异性对试验结果的影响,每次试验前,选用 30 mm/h 降雨强度进行前期降雨。为了研究浅沟发育的完整过程,根据降雨强度和地面坡度变化,连续进行降雨试验 2~4 次,使浅沟充分发育,也就是后一次降雨试验是在前一次降雨试验形成的浅沟形态的基础上进行,这样就可以完整模拟浅沟雏型出现后的坡面浅沟侵蚀过程。模拟降雨试验设计包括 50、75 和 100 mm/h 降雨强度及 15°、20° 和 25° 地面坡度,每次试验历时约 70 min。模拟试验降雨强度是根据黄土高原引起强度土壤侵蚀的 30 min 最大降雨强度(即 0.75 mm/min)为指标进行设计,50、75 和 100 mm/h 降雨强度对应的 30 min 最大降雨强度分别为 0.825、1.25 和 1.65 mm/min。

试验过程中,用测尺法结合数码相机连续拍照监测浅沟长、宽、深动态变化过程,每隔 5 min 分别在距浅沟出水口处 1、2、3、4 和 5 m 处量测浅沟的深度和宽度,同时测量浅沟长度。

由于对浅沟发育过程研究较少,目前尚未有划分浅沟发育不同阶段的标准。这里根据浅沟沟头溯源侵蚀、沟壁扩展和沟床下切的相对活跃程度区别浅沟发育的初期、中期和后期阶段。认为当浅沟发育处于初期阶段时,沟头溯源侵蚀、沟壁扩展和沟床下切均相对活跃,且溯源侵蚀速率大于沟壁扩展速率和沟床下切速率;当浅沟发育处于中期阶段时,浅沟沟壁扩展和沟床下切相对活跃,而溯源侵蚀过程基本停止;当浅沟发育过程处于后期阶段时,沟壁扩展相对活跃,而溯源侵蚀过程停止,沟床下切过程相对稳定。

2 浅沟发育过程

浅沟发育过程包括沟头溯源侵蚀、沟床下切和

沟壁扩张三种过程,浅沟发育不同阶段有不同溯源侵蚀、沟床下切和沟壁扩张的速率。试验观测资料表明,随着降雨强度和坡度的增加,浅沟沟床下切和沟壁扩张速率,尤其是浅沟沟头溯源侵蚀速率明显加快。如在降雨强度为 100 mm/h 和地面坡度为 25° 试验条件下,连续进行 2 次降雨试验,浅沟已充分发育;而在降雨强度为 50 mm/h 和坡度为 15° 的试验条件下,连续进行 4 次降雨试验,浅沟才充分发育。为了显示浅沟发育的整个过程,这里以降雨强度为 50 mm/h 和坡度为 15° 的试验为例,说明浅沟发育不同阶段溯源侵蚀、沟床下切和沟壁扩张变化规律。图 2 表明,浅沟发育初期,在浅沟沟槽出现多个下切沟头,这些下切沟头的溯源侵蚀及其随之而来的沟壁崩塌和沟槽床下切,开始了浅沟侵蚀过程。

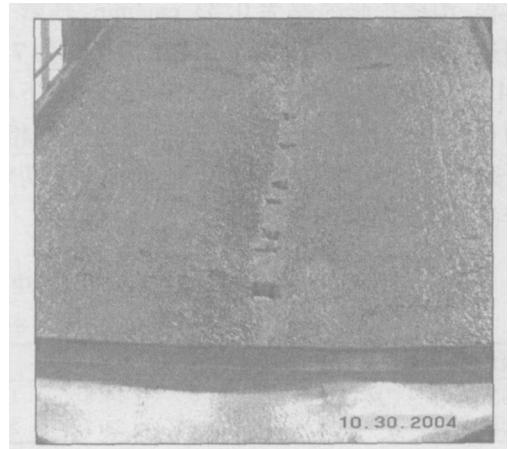


图 2 浅沟沟槽出现多个下切沟

Fig 2 Ephemeral gully head cuts at the ephemeral gully channel

在浅沟发育初期阶段,即第一次降雨试验过程中,沟头溯源侵蚀非常活跃(表 1)。浅沟长度由降雨历时 9 min 的 315 cm 增加到 12 min 的 460 cm 及 19 min 的 500 cm,沟头溯源侵蚀速率为 18.5 cm/min。降雨历时 19 min 后,随着降雨历时的增加,沟头侵蚀溯源速率减小。如当降雨历时为 47 min 时,浅沟长度为 560 cm,此阶段沟头溯源侵蚀速率仅为 2.1 cm/min。此后,由于浅沟沟头已到达试验土槽顶端,沟头侵蚀溯源过程基本停止。此现象类似于黄土丘陵区浅沟沟头接近分水岭部位时,沟头溯源侵蚀过程基本停止。与此同时,这一阶段浅沟沟壁扩张和沟床下切也处于相对活跃期。浅沟的宽度由降雨历时 12 min 的 8 cm 增加到 43

表 1 第一场降雨过程中平均浅沟长度、宽度和深度随降雨历时的变化

Table 1 Average ephemeral gully length width and depth at the second rainfall process

试验历时 (min)	9	12	19	24.5	31	36	43	47	53	59
浅沟长 (cm)	315	460	500	520	525	535	540	580	580	580
浅沟宽 (cm)	-	8	8.6	9.7	11	13.8	14.6	14.6	14.6	14.6
浅沟深 (cm)	-	5.6	5.8	7	11.8	17	17.2	16.8	16.6	17

min的 14.6 cm, 浅沟的深度由降雨历时 12 min的 5.6 cm 增加 43 min的 17.2 cm, 浅沟沟壁扩张速率和沟床下切速率分别为 0.21 和 0.37 cm/min, 此结果表明, 该阶段沟侵蚀溯源对侵蚀产沙有较大的贡献。

在第一次试验侵蚀形态基础上进行的第二次试验表明(表 2), 浅沟沟壁扩张速率明显加快。浅沟宽度由降雨历时 7 min的 14.2 cm 增加到 56 min的 30.6 cm, 沟壁扩张速率明显大于第一次试验过程, 沟壁扩张速率为 0.33 cm/min, 是第一次试验过程的 1.6 倍。浅沟深度由降雨历时为 7 min的 14.2 cm 增加到 23 min的 23.6 cm, 沟床下切速率为 0.33 cm/min, 与第一次试验过程基本相同。此研究结果表明, 该阶段沟壁扩张和沟床下切对侵蚀产沙有较大的贡献。

表 2 第二场降雨过程中平均浅沟宽度和深度随降雨历时的变化

Table 2 Average ephemeral gully width and depth at the second rainfall process

试验历时 (min)	7	15	19	23	28	35	42	46	52	56
浅沟宽 (cm)	14.2	14.4	14.8	14.6	21.4	22.4	25.2	26.2	30.4	30.6
浅沟深 (cm)	18.4	22.1	23.2	23.6	18.4	19.8	19	18.4	19.6	20.4

表 3 第三场降雨过程中平均浅沟宽度和深度随降雨历时的变化

Table 3 Average ephemeral gully width and depth at the second rainfall process

试验历时 (min)	8	14	19	23	30	34	40	45	51	56
浅沟宽 (cm)	30	30.2	30.6	30	33.8	34.4	34	34	34.6	35
浅沟深 (cm)	21.4	25.6	26.2	26.2	24.8	26.6	26.2	25.7	24.9	25.3

表 4 第四场降雨过程中平均浅沟宽度和深度随降雨历时的变化

Table 4 Average ephemeral gully width and depth at the first rainfall process

试验历时 (min)	8	13	19	24.5	29	35	41	47	55	59
浅沟宽 (cm)	36.6	36.8	36.8	36.8	37	37.2	40.6	41	42.4	43
浅沟深 (cm)	25.7	26.8	26.6	22.8	25.6	27.2	25.4	25.8	24	25.2

从表 1~4 可以看出, 在浅沟发育过程中, 浅沟长度和宽度总体呈增加趋势, 而浅沟深度出现波动。造成此现象的主要原因是试验过程中沟壁崩塌造成浅沟沟槽出现临时性沉积, 使浅沟深度变浅。

在第二次试验侵蚀形态基础上进行的第三次试验表明(表 3), 浅沟沟壁扩张速率和沟床下切速率明显小于第二次试验过程。浅沟宽度由降雨历时 8 min的 30 cm 增加到 56 min的 35 cm, 沟壁扩张速率仅为 0.1 cm/min; 浅沟深度由降雨历时 8 min的 21.4 cm 增加到 34 min的 26.6 cm, 沟床下切速率为 0.2 cm/min, 说明浅沟发育过程处于相对稳定阶段。

在第三次试验侵蚀形态基础上进行的第四次试验表明(表 4), 浅沟沟壁扩张速率和沟床下切速率与第三次试验过程基本相同, 反映浅沟发育过程处于后期阶段。如浅沟宽度由降雨历时 8 min的 36.6 cm 增加到 59 min的 43 cm, 沟壁扩张速率为 0.1 cm/min; 浅沟深度趋于稳定, 说明浅沟发育已经进入后期稳定阶段。

3 浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献

浅沟侵蚀在黄土高原丘陵沟壑区第一和第二副区广泛分布, 平均分布密度为每 15 m 宽分布一条浅沟^[9], 浅沟侵蚀量占梁坡侵蚀产沙量的 46%

以上^[3,4]。为了研究浅沟侵蚀模拟试验中浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献,我们根据量测的浅沟长、宽和深,用容积法计算浅沟侵蚀量,并将容积法计算值换算成用填土法计算值^[25],研究浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献(表5)。

表5 浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献

Table 5 Contribution of ephemeral gully erosion to total erosion

浅沟发育阶段	浅沟侵蚀量 (kg)	坡面总侵蚀量 (kg)	浅沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的 百分数(%)
初期	64.4	108.7	59.2
中期	98.8	169.1	58.4
后期	130.4	218.6	59.7
后期	79.9	300.6	26.6

从表5可知,在浅沟发育初期,由于沟头溯源侵蚀、沟槽下切和沟壁崩塌都很活跃,此时浅沟侵蚀量占总坡面侵蚀的59.2%。在浅沟发育中期,受试验条件的限制沟头溯源侵蚀基本停止,而沟槽下切和沟壁扩张仍较快发展,此时浅沟侵蚀量占总坡面侵蚀的58.4%。在浅沟发育后期的早期阶段,由沟壁扩展仍相对活跃,此时浅沟侵蚀量仍占总坡面侵蚀的59.7%;在浅沟发育后期的末期阶段,由于沟槽下切和溯源侵蚀过程基本停止,加上沟壁崩塌造成浅沟沟槽局部部位发生临时性淤积,使浅沟侵蚀量仅占坡面总侵蚀的26.6%。这些研究结果与野外观测结果类同^[3,4],也证明模拟浅沟侵蚀模拟试验的研究方法是可行。

4 结论

浅沟侵蚀是坡面侵蚀产沙的重要来源,研究浅沟发育过程对正确估算浅沟侵蚀的产沙作用有重要意义。本文通过在室内人工建造浅沟模型和模拟降雨试验,研究了浅沟发育过程,研究结论如下:

1) 浅沟发育不同阶段对应于不同的侵蚀过程。在浅沟发育初期,沟头溯源侵蚀、沟壁扩张和沟床下切均相对活跃,且溯源侵蚀速率大于沟壁扩张速率和沟床下切速率;在浅沟发育中期,以沟槽下切和沟壁扩张为主;在浅沟发育后期,以沟壁扩张为主,但扩张速率明显小于浅沟发育的初期和中期。

2) 在浅沟发育过程中,浅沟长度和宽度呈增加趋势,而浅沟深度出现波动。造成此现象的主要原因是试验过程中沟壁崩塌造成浅沟沟槽出现临

时性沉积,使浅沟深度变浅。

3) 浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙有重要贡献。在浅沟发育初期和中期阶段,浅沟侵蚀量占总坡面侵蚀产沙的58%;在浅沟发育后期,受试验条件影响,浅沟侵蚀量占总坡面侵蚀产沙的26%~59%;表明浅沟侵蚀是坡面侵蚀产沙的重要来源。模拟试验研究结果与野外实际观测结果基本类同,证明模拟浅沟侵蚀模拟试验的研究方法可行。

本文仅研究了浅沟发育不同阶段的沟头溯源侵蚀、沟壁扩张和沟槽下切变化规律。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,有关浅沟侵蚀发生的临界动力条件、表征浅沟水流的水动力学参数、建立浅沟侵蚀过程的计算方程等有待做大量的研究工作。

参考文献:

- [1] 唐克丽,郑世清,席道勒,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] 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): 39~47.
- [3] 江忠善,王志强,刘 志. 黄土丘陵区站流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1~9.
- [4] 郑粉莉,康绍忠. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理[J]. 地理学报, 1998, 53(5): 422~428.
- [5] Casali J, Lopez J J, Giraldez JV. Ephemeral gully erosion in southern Navarra [J]. Catena 1999, 36: 65- 84.
- [6] Valcarlos M, Taboada M T, Paz A, etc. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain [J]. Catena 2003, 50: 199- 216.
- [7] USDA - NRCS America. s private land A geography of hope [R]. USDA - NRCS, Washington, D. C. 1977.
- [8] Zheng Fenli, Huang Chi-hua. Gully erosion [A]. Lal Rattan. Encyclopedia of Soil Science [M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002: 630- 634.
- [9] 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.
- [10] 郑粉莉,张科利,唐克丽,等. 植被破坏与恢复对坡面浅沟侵蚀的影响[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993 (17): 54~59.
- [11] Vandaele K, Poesen J, Van Wesemael B. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision [J]. Geomorphology, 1996, 16 (2): 161- 173.
- [12] Moore ID, Burch G J, MacKenzie DH. Topographic effects on the distribution of surface soilwater and the location of ephemeral gullies [J]. Trans ASAE, 1988, 31(4): 1098- 1107.
- [13] Desmet P J J, Govers G. Two-dimensional modelling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography [J]. Catena 1997, 29: 283- 306.

- [14] Casali Javier Bennett Sean J Robinson KerryM. Processes of ephemeral gully erosion [J]. International Journal of Sediment Research, 2000, 15(1): 31- 41
- [15] Foster G R. Understanding ephemeral gully erosion [A]. In: Committee on Conservation Needs and Opportunities Assessing the National Resources Inventory[M]. Soil Conservation Service Board on Agriculture, National Research Council, Washington D. C. National Academy Press, 1986, 90- 125
- [16] 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): 59~ 62
- [17] Antonina Capra Baldassare. Ephemeral gully erosion in a wheat - cultivated area in Sicily (Italy) [J]. Biosystems Engineering 2002, 83(1): 119- 126
- [18] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展 [J]. 地理科学, 2003, 23(2): 230~ 235
- [19] Lentz R D, Dowdy R H, Rust R H. Soil property patterns and topographic measures associated with ephemeral gully erosion [J]. J Soil Water Conserv, 1993, 48, 355 - 361.
- [20] Antonina Capra Baldassare Scicobone. Ephemeral Gully Erosion in a Wheat- cultivated Area in Sicily (Italy) [J]. Biosystems Engineering 2002, 83, 119 - 126
- [21] 柴宗新, 范建容, 刘淑珍. 金沙江下游元谋盆地冲沟发育特征和过程分析 [J]. 地理科学, 2001, 21(4) 339~ 342
- [22] 王小丹, 钟祥浩, 范建容. 金沙江干热河谷元谋盆地冲沟沟头形态学特征研究 [J]. 地理科学, 2005, 25(1): 63~ 65.
- [23] 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): 59~ 62
- [24] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion [J]. Catena 1999, 37 (3- 4): 393- 399.
- [25] 郑粉莉. 细沟侵蚀量的测算方法的探讨 [J]. 水土保持通报, 1989, 9(4): 41~ 45, 49

Ephemeral Gully Development Process at Loess Steep Hillslope

ZHENG Fen^{1, 2}, WU Min^{1, 2}, ZHANG Yubin^{1, 3}, DING Jin^{1, 3}

(1. The 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 Resource, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Northwest A& F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract According to the topographic characteristic parameters of ephemeral gully at loess steep hillslopes, the model of ephemeral gully shape at initial stage was made to quantify the change processes of ephemeral gully headcut advance, gully wall collapse and channel deepcutting in three stages (the beginning, middle and late stages) of ephemeral gully development. The results showed that different stages of ephemeral gully development corresponded to different ephemeral gully erosion process. In the beginning stage of ephemeral gully development, ephemeral gully headcut, gully wall collapse and channel deepcutting were very active, the speed of ephemeral headcut advance was much higher than the speeds of gully wall expansion and channel deepcutting. In the middle stage, gully wall collapse and channel deepcutting were dominant. In the late stage, gully wall collapse was dominant, but the speed of gully wall expansion was lower than that in middle stage. In the beginning and middle stages of ephemeral gully development, ephemeral gully erosion accounted for 58. 4% of the total sediment yield in ephemeral gully catchment, in the late stage, ephemeral gully erosion took up 26% - 59. 4% of the total sediment yield.

Key words ephemeral gully development, soil erosion process, loess steep hillslope, simulated rainfall experiment