

沟蚀过程研究进展

郑粉莉 徐锡蒙 覃超

(西北农林科技大学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: 从国内外沟蚀概念对比、沟蚀发生临界模型、沟蚀过程影响因素、沟蚀预报模型、沟蚀研究方法与技术等方面综合评述了近60年国内外沟蚀过程研究进展。提出了今后需要加强研究的重点领域, 包括: 沟蚀监测方法的标准化和规范化研究; 沟蚀过程中沟溯源侵蚀、沟壁崩塌和沟底下切过程的定量表达; 浅沟和切沟侵蚀的泥沙搬运能力量化及泥沙输移连续方程; 包含浅沟侵蚀的坡面侵蚀预报模型和包含沟蚀的流域侵蚀预报模型; 沟蚀防治技术研究。

关键词: 浅沟侵蚀; 切沟侵蚀; 预报模型; 研究方法

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0048-12

A Review of Gully Erosion Process Research

Zheng Fenli Xu Ximeng Qin Chao

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Gully erosion process researches in recent 60 years were reviewed from the following aspects: definition comparison of gully erosion at home and abroad, critical model for the initiation of gully erosion, influence factors of gully erosion process, prediction model of gully erosion, and gully erosion research methodology. Key research fields were also proposed, including standardization and normalization of gully erosion monitoring; quantification of head ward erosion, sidewall collapsing erosion, and deep cut erosion in gully erosion process; quantification of sediment transport capacity and establishment of sediment transportation continuity equation in ephemeral gully and gully erosion process; soil erosion prediction model at slope scale which included the ephemeral gully erosion, and soil erosion prediction model at watershed scale which covered the gully erosion; methodology research on gully erosion control.

Key words: ephemeral gully erosion; gully erosion; prediction model; research methodology

引言

沟蚀在我国分为浅沟侵蚀、切沟侵蚀、冲沟侵蚀和干沟侵蚀等^[1], 而在国外分为临时性切沟侵蚀(Ephemeral gully erosion)和切沟侵蚀(Gully erosion)等^[2]。浅沟侵蚀是坡耕地土壤侵蚀的主要方式之一, 其发生、发展不仅吞蚀耕地, 影响耕地质量和作物产量, 而且也是输送径流泥沙与污染物运移的重要通道; 切沟侵蚀, 尤其是处于发育活

跃期的切沟侵蚀是流域侵蚀产沙的重要来源, 其发生发展过程对现代地貌发育及演化过程具有重要的影响。60年来, 国内外沟蚀过程研究主要聚焦在浅沟和切沟侵蚀, 并在沟蚀特征、影响因素、临界模型、预报模型、研究方法与技术等方面取得了重要进展。本文基于对过去几十年沟蚀过程研究成果的集成分析, 综合评述国内外浅沟侵蚀与切沟侵蚀过程的研究进展, 提出今后应加强研究的重点领域。

收稿日期: 2016-05-21 修回日期: 2016-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271299)

作者简介: 郑粉莉(1960—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报及侵蚀环境效应评价研究, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

1 浅沟侵蚀

1.1 国内外浅沟侵蚀概念的对比

我国对于浅沟侵蚀的研究是从土壤侵蚀分类和坡面土壤侵蚀垂直分带的研究开始的。朱显谟^[1]早在 1956 年就将现代沟蚀分为浅沟侵蚀和切沟侵蚀,认为浅沟由主细沟演变而来,并能发展为切沟。浅沟不影响横向耕作,但犁耕不能消除浅沟形态痕迹。文献[3]中指出,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,一般为 20~30 cm,也有超过 50 cm 的;而在南方花岗岩风化壳丘陵斜坡上,也可发生浅沟,其宽度约 1 m 左右,深度可超过 0.5 m。其他学者已将浅沟侵蚀划为一种主要侵蚀类型^[4-12],并分析了浅沟侵蚀在坡面侵蚀中的重要性^[13-15]。罗来兴^[9]将没有明显沟缘的坡面顺坡侵蚀槽界定为浅沟;而朱显谟^[1]认为这种侵蚀槽是浅沟发展的最后阶段,坡面上若干条侵蚀槽近似平行排列,使整个坡面呈现瓦背状起伏(图 1)。刘元保等^[8]也认为,浅沟发生在坡面顺坡集流槽的底部(宽度一般在 2 m 以内),一般不阻碍普通工具耕作,浅沟侵蚀为暴雨发生时汇集于集流槽底部由径流冲刷形成的新的侵蚀沟

槽过程中所造成的土壤侵蚀。

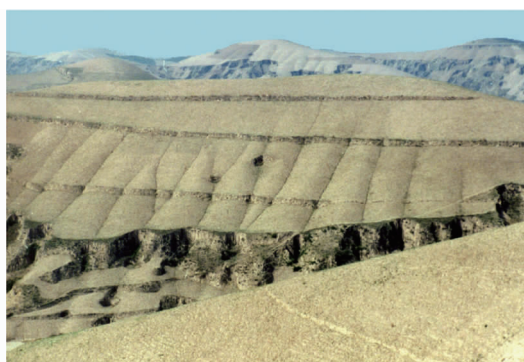


图 1 我国黄土高原坡面浅沟分布

Fig. 1 Ephemeral gully distribution on the Loess Plateau

国外有关浅沟侵蚀概念的研究以美国为代表。FOSTER^[2]将沟蚀分为临时切沟侵蚀和切沟侵蚀,认为临时切沟每次侵蚀的宽度和深度大于细沟,但小于切沟,不妨碍耕作,但也不能消除其痕迹。随着年复一年耕作与侵蚀的交替,临时切沟可发展为固定切沟。由此可见,国外的临时切沟与我国的浅沟指的是同一种侵蚀类型。为此,ZHENG 等^[16]在撰写《Encyclopedia of Soil Science》沟蚀(Gully)条目时,将我国定义的浅沟侵蚀与美国定义的浅沟侵蚀归为同一类沟蚀类型(Ephemeral gully)。有关细沟、浅沟和切沟侵蚀的区别见表 1。

表 1 细沟侵蚀、浅沟侵蚀和切沟侵蚀特点的比较

Tab. 1 Comparison of characteristics of rill erosion, ephemeral gully erosion and gully erosion

特点	细沟侵蚀	浅沟侵蚀	切沟侵蚀
耕作措施	细沟一般可被耕作措施消除;不会在同一地方再次发生	浅沟是一种过渡形态,能够进行横向耕作但不能消灭痕迹;并会发生在相同位置	切沟不能被横向耕作
大小	沟宽和沟深一般不超过 20 cm,小于浅沟	大于细沟但小于固定切沟	通常大于浅沟
断面形态	断面一般呈狭槽形	断面一般呈宽浅形,由于横向耕作措施的存在,沟头和沟壁不明显	断面呈 V 型,沟头和沟壁明显
流路形态	由断续的小细沟不断连接形成的平行的网状结构;在浅沟沟头、梯田或者沉积发生处终止;通常有固定的大小和间距	通常沿着水流流路呈现树枝状分布;浅沟沟头一般发生在细沟合并处;受到耕作措施、作物垄向、梯田以及其他人工措施的影响	在自然集水内多呈现枝状、平形状分布;但在道路沟渠、梯田或者泄洪渠上不呈枝状分布
发生位置	通常发生集水区上部的平整的坡面上	发生在集水区中部低洼的集水通道上	发生在有很大集水面积的集水区下部
侵蚀深度	土壤在耕作后被填入细沟内,但每年的侵蚀和耕作会使得整个坡面的土层厚度下降	浅沟一般会切穿耕层到达犁底层,土壤随着耕作措施、坡面片蚀和细沟侵蚀带入浅沟内造成比侵蚀沟槽更大面积的侵蚀	切沟一般会切穿土层直至基岩

1.2 浅沟形成过程

浅沟是在径流冲刷和人类耕作的共同作用下由主细沟不断演化而来的。坡面细沟形成后,径流相对集中于细沟沟槽,径流的冲刷使得细沟逐渐加宽、加深,并与上下不同部位的细沟合并,形成更大的细沟,即主细沟。而人类耕作后,使主细沟形态消失,但由于主细沟发生部位与坡面其他部位的表面形态已完全不同,因而在下一次暴雨

侵蚀过程中,主细沟发生的位置便可汇集更多的径流,使其与邻区的细沟之间的差异增大。径流冲刷—耕作—径流冲刷如此不断循环,径流汇集面积愈益增大,再次发生暴雨时,其能接受范围内的径流不断汇集,形成股流继而发生浅沟侵蚀,其结果导致坡面上出现耕作不能平复的无明显沟缘的弧形沟道,并使原来平整的坡面形成了瓦背状地形(图 1)。

浅沟侵蚀过程包括浅沟沟头溯源侵蚀、浅沟水流对浅沟沟槽的冲刷下切以及浅沟沟壁的崩塌扩张侵蚀。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,沟头的溯源侵蚀延伸了浅沟沟槽。



(a) 美国



(b) 黄土高原

图2 坡面浅沟侵蚀

Fig. 2 Ephemeral gully erosion on slopes

1.3 浅沟发生的临界地形条件

浅沟侵蚀是坡面集中股流侵蚀的结果,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决定了径流量和径流动能的大小^[17]。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中部和中下部。VANDAELE等^[18]研究发现,浅沟侵蚀发生的临界模型可用浅沟上方坡面坡度 S 和单位汇水面积

A 进行定量表达,即 $SA^b > a$ 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^[18-26](表2)。TORRI等^[27]对比了世界各地63个已经建立的浅沟形成的临界地形模型,并对不同环境状况下的参数值变化规律进行了总结,认为需要建立更完善的,包括土地利用、气候变化和自然灾害因素在内的基于物理过程的模型来判定浅沟发生的临界条件。

表2 部分浅沟侵蚀发生临界模型对比

Tab. 2 Comparison of partial topographic critical threshold models for ephemeral gully initiation

临界模型	模型表达式	研究区
Vandaele 模型 I ^[18]	$SA^{0.4} > 0.5$	比利时
Moore 模型 ^[21]	$AS > 18$	澳大利亚
Vandaele 模型 II ^[18]	$S > 0.025(A/10\ 000)^{-0.4}$	葡萄牙
Desmet & Gover 模型 ^[20]	$SA^{0.4} > 0.72$	比利时
Vanwalleghem 模型 ^[22]	$S = 0.020A^{-0.141}$	比利时
张科利模型 ^[23]	$S = 2\ 974 - 175.38J + 3.44J^2$	安塞县南沟
李斌兵模型 ^[24]	$SA^{0.1045} > 0.5227$	安塞纸坊沟
丁晓斌模型 ^[25]	$SA^{0.4334} > 2.2434$	富县子午岭地区
胡刚模型 ^[26]	$S = 0.0631A^{-0.4643}$	东北黑土区

国内在这一方面的研究主要集中在浅沟分布统计分析方面。陈永宗^[4]较早地研究了浅沟发生的临界坡长。唐克丽等^[28]通过对杏子河流域考察发现,浅沟侵蚀是导致沟头前进和沟谷不断扩展的直接根源,也是发生切沟侵蚀的潜在危险;并确定了浅沟分布的地形部位,量算了浅沟侵蚀带分布面积,测算了浅沟侵蚀量。刘元保等^[8]基于野外调查发现,浅沟顶端到分水岭的距离以及坡面顺坡集流槽的间距与坡度呈线性相关。张科利等^[23,29]对黄土高原丘陵区坡面浅沟侵蚀发育特征进行了研究,发现浅沟多分布于 $18^\circ \sim 35^\circ$ 的陡坡,其中 $22^\circ \sim 31^\circ$ 陡坡范围出现的频率达75.5%,平均坡度为 26.45° ;发生

浅沟的临界坡度介于 $15^\circ \sim 20^\circ$,平均为 18.2° ;自浅沟沟头到分水岭的距离为发生浅沟的临界坡长,其特征值范围为 $20 \sim 60$ m,平均值为40 m;临界汇水面积范围为 $300 \sim 1\ 200$ m²,以 $400 \sim 800$ m²居多,平均值为657.2 m²;浅沟分布密度范围为 $10 \sim 60$ km/km²,以 $15 \sim 40$ km/km²居多,平均为29.77 km/km²;浅沟密度也可以用浅沟分布间距表示,浅沟分布间距以 $15 \sim 20$ m的间距出现频率最高达53.5%。发生浅沟的临界坡度、坡长、汇水面积及分布间距之间呈二次曲线相关,当坡度为 26.25° 时,浅沟侵蚀的分布间距、临界坡长和临界汇水面积的值最小。姜永清等^[30]利用航拍照片分析了黄土丘陵区周屯沟流域浅沟分

布规律,并量算了流域浅沟分布面积、分布密度、平均长度、坡度等。秦伟等^[31]基于 Quickbird 高分辨率遥感影像和数字高程模型,提取了坡面浅沟分布的地形参数,发现在黄土丘陵沟壑区,坡面坡度、长度、坡向以及汇水坡长是影响坡面浅沟数量的主要地形要素,发生浅沟侵蚀临界坡度的上限与下限分别介于 $26^{\circ} \sim 27^{\circ}$ 和 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$,而临界坡长介于 $50 \sim 80$ m。

在浅沟侵蚀发生的临界模型方面,胡刚等^[26]对东北漫川漫岗黑土区进行实地测量及地形图量算,建立了浅沟临界模型,校验了 Moore 的沟蚀发生公式,通过与野外实测浅沟和切沟发生位置对比,临界模型预测的沟蚀位置较好地反映了野外实际状况。李斌兵等^[24]通过 GPS 实测数据并结合 GIS 空间分析与统计回归方法,建立了适用于黄土高原丘陵区的浅沟侵蚀临界模型,发现在黄土高原丘陵沟壑区,随着坡度的增大,发生浅沟侵蚀临界值 a 增大,高强度降雨致使判定式中汇水面积的指数 b 值减小,从而降低了汇水面积的影响作用;同时对临界模型的验证结果表明,基于所建临界模型提取的浅沟侵蚀分布区与野外实际相当吻合。丁晓斌等^[25]利用高精度的 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,发现国外模型不适用于黄土高原,同时基于子午岭地区实测的 GPS 数据,构建了适用于子午岭地区的浅沟侵蚀临界模型,且模型验证表明,模型模拟的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,其预报精度达 95%。

1.4 浅沟侵蚀影响因素

影响浅沟侵蚀的因素有侵蚀动力因子(降雨、上方汇流、地下潜流)、地形因子(坡度、坡长、坡形等)、地表植被、土壤、土地类型和人类活动等。

1.4.1 降雨对浅沟侵蚀的影响

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^[32]通过野外小区观测资料指出:浅沟侵蚀基本上与降雨量无关,浅沟侵蚀主要受降雨强度影响,当降雨强度由 1.31 mm/min 增大到 3.52 mm/min 时,在降雨量大体相当的情况下,每毫米降雨引起的侵蚀量由 0.543 kg 增加到 2.626 kg。当降雨强度增大 2.687 倍时,浅沟侵蚀量增加 4.836 倍。CAPRA 等^[33]在意大利西西里岛典型小流域内的研究表明,当 3 d 最大降雨量达到 51 mm 时,流域内即开始发生浅沟侵蚀;虽然一年内可以平均监测到 7 场侵蚀性降雨,但浅沟的发生和发育均是由单场侵蚀性暴雨所导致的,这与黄土高原等半干旱地区的浅沟发育过程一致。此外,降雨在年内的分布、降雨雨型等对浅沟发育过程也有重

要影响,需要进一步深入研究。

1.4.2 上方来水来沙对浅沟侵蚀的影响

浅沟上方来水来沙对浅沟侵蚀带产沙有重要影响。郑粉莉等^[34]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,结果表明次降雨条件下,坡上方来水使浅沟侵蚀带的侵蚀量增加 $12\% \sim 84\%$;年平均增加 $38\% \sim 66\%$;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关系,增沙系数与上方汇水含沙量呈负相关关系;当浅沟沟槽处被翻耕后,由于耕层的土壤抗侵蚀力弱,上方汇水使浅沟迅速发育,增沙系数较大,而当下垫面浅沟沟槽处犁底层露出后,由于该层有较强的抗冲性,浅沟发育速度减慢,水流侵蚀和搬运的物质较少,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^[35]设计了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。研究结果表明,上方侵蚀带的来水来沙对浅沟侵蚀带侵蚀产沙量影响重大,在相同上方来水条件下,上方来沙强度的减小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大而增大,其增加幅度为 $4.4\% \sim 83.5\%$ 。上方来水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带产生重要影响, 1 L/min 的上方汇流可引起单位长度浅沟剥离率达 $0.1 \sim 0.3$ kg/(m·min)。上方来水来沙对浅沟径流流速和径流含沙量也具有重要影响。上方来水使浅沟沟坡径流流速增大,较无上方来水时增大 $12\% \sim 24\%$,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 $45.6\% \sim 58.4\%$ 。上方来水时的浅沟土槽的径流含沙量较无上方来水时的含沙量增大 $5.4\% \sim 287.4\%$,随着降雨强度的增大,含沙量增幅有减小的趋势。

1.4.3 地下潜流对浅沟侵蚀的影响

通过土壤大孔隙或土壤管道运输的地下潜流很难被观测到,因而常常被研究人员所忽视,但地下径流的潜蚀影响着坡面浅沟侵蚀的发生和发展过程^[36]。WILSON 等^[37]研究表明,地下潜流的存在加快了浅沟发生的过程,产生的侵蚀量也变大,而且普通针对地表径流的水保措施很难对地下潜流产生的侵蚀进行防治。在浅沟的形成过程中,地下潜流很难被监测,随着径流的冲刷土壤孔隙慢慢变大,表层土壤的突然崩塌,崩塌的土壤颗粒被径流搬运后便

形成了浅沟,而这一过程受到了土壤性质和土地利用的多因素影响^[38]。有关地下径流对浅沟侵蚀的影响还有待进一步研究。

1.4.4 地形对浅沟侵蚀的影响

地形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。

(1)坡度:坡度影响坡面的受雨面积及雨量,从而影响坡面径流、入渗和径流动能的大小。浅沟发生的临界坡度是临界动能的具体体现之一。张科利^[39]指出黄土丘陵区浅沟发生的临界坡度为 18.2° ,而以 $22^\circ \sim 31^\circ$ 分布居多。另一方面,坡度越大,坡面物质重力在沿坡面向下方向的分量也就越大,稳定性就越差、越容易发生浅沟侵蚀。在黄土丘陵区,坡的上部坡度较缓,一般只发生面蚀和细沟侵蚀,而在坡面中下部坡度渐增,易于形成浅沟^[4,23,40]。随着坡度由小变大,浅沟的分布间距会呈现由大变小再变大的趋势^[39]。

(2)坡长:坡长影响汇集过程及径流量的多少,决定着浅沟侵蚀的发生,张科利^[39]指出浅沟侵蚀的发生要求有一定的临界坡长,其特征值范围为 $20 \sim 60 \text{ m}$,平均为 40 m 左右。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,该特征值为 $300 \sim 1\,200 \text{ m}^2$,以 $400 \sim 800 \text{ m}^2$ 之间居多,平均为 657 m^2 。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^[32]。

(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性,天然坡形是多种多样的。从一架完整坡面来看,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^[41]。不同坡面浅沟的分布密度由大到小依次为:凹形坡、直形坡、凸形坡,且变化于 $10 \sim 60 \text{ km/km}^2$,集中于 $15 \sim 40 \text{ km/km}^2$ ^[29]。坡形影响着侵蚀量,唐克丽等^[28]研究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,而直形坡一般尚无浅沟形成,在其他条件相同的情况下,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% 。

1.4.5 地面植被对浅沟侵蚀的影响

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大大减少浅沟侵蚀。张科利^[39]通过人工模拟试验指出:种草浅沟的侵蚀量比裸露时减少 96.6% ;野外调查也发现,已经发育浅沟的坡面一经撂荒后,因浅沟底部生草的原因而抑制浅沟侵蚀的发生。郑粉莉等^[35]通过在子午岭调查测算指出:人为破坏植被的开垦地中,梁峁坡的浅沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的 $47\% \sim 72\%$ 。

1.5 浅沟侵蚀预报模型

由于定量表达浅沟侵蚀过程的研究相对薄弱,导致现有的侵蚀预报模型(RUSLE—revised universal soil loss equation, WEPP—water erosion prediction project, SWAT—soil and water assessment tool)均未考虑浅沟侵蚀的影响^[42-45]。因此,美国农业部联合有关单位,建立了浅沟侵蚀模型(Ephemeral gully erosion model, EGEM)^[46]。该模型由水文模块和侵蚀模块组成,该模型用于预报单条浅沟年平均土壤侵蚀量或者单条浅沟次降雨(24 h)的浅沟侵蚀量。在年平均浅沟侵蚀量的预报中,每年被分成至少3个阶段代表不同的土壤可蚀性、地表糙度和作物情况,分别是耕作后、作物成熟时期、冬作物生长期或休闲时期,最后,每个阶段将对应不同的几个月份,对应不同的降雨侵蚀力,而最终计算的浅沟侵蚀过程也不同。

由于建模过程提出了以下假设,因而给模型的推广应用带来了限制:①浅沟只能侵蚀到耕作层深度或者更深的具有明显的抗冲抗蚀层,用户需要确定浅沟的最大侵蚀深度。②浅沟侵蚀深度不能超过 46 cm ,超过这一深度,浅沟侵蚀的方程不再适用;而实际上浅沟沟头下切和沟壁崩塌等典型的浅沟侵蚀过程均会导致其深度超过 46 cm 。③由冻融过程而引起的侵蚀量尚未考虑,用户可以适当调整径流剪切力、可蚀性因子、径流曲线以增大或减少侵蚀量,消除由于冻融带来的侵蚀量误差。④目前该模型只适用于单条浅沟的模拟,不适合预报有分叉的浅沟。⑤浅沟深度沿沟长方向是固定值,且浅沟横断面是矩形。而实际上,一次降雨过程,浅沟的深度和宽度沿坡长呈动态变化,浅沟横断面也可能不是矩形。因此,上述假设导致浅沟侵蚀预报模型在不同地区的适用性较差^[47-50]。近年来,研究者们通过研究集中流侵蚀的共性,借鉴 AnnAGNPS 和 CREAM 等模型的基本原理,预报浅沟侵蚀过程,并取得了较好的效果^[51-54]。而国内浅沟侵蚀预报模型大多数是经验模型,将浅沟侵蚀因子嵌入到坡面侵蚀预报经验

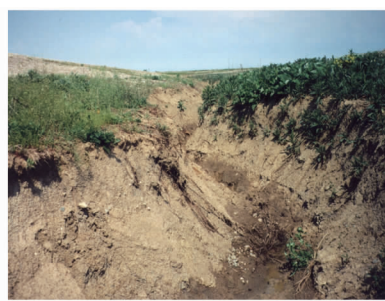
模型中,取得了较好的预报结果^[55]。

综上所述,目前关于浅沟侵蚀的研究在浅沟侵蚀机理和浅沟侵蚀模型等方面积累了大量的成果,对认识浅沟侵蚀形成的条件、浅沟的发育规律、浅沟侵蚀预报及有针对性的水土保持工作的开展都起到了一定的促进作用,但由于地区差异、浅沟侵蚀过程的复杂性以及浅沟形成过程受人均为耕作活动影响的特殊性,目前有关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、浅沟侵蚀的坡面土壤流失预报模型等方面的研究还相对薄弱,有待加强。

2 切沟侵蚀

切沟侵蚀,尤其是发育活跃期的切沟侵蚀是最重要的侵蚀产沙方式之一,其对流域侵蚀产沙有重

要贡献。如在美国密西西比黄土区,切沟侵蚀量占侵蚀产沙量的 10% ~ 30%^[56];在欧洲黄土区,切沟侵蚀量至少占流域侵蚀产沙量的 30%^[57];在西欧,切沟侵蚀占 50% ~ 80%^[58]。在我国,由于特殊的自然地理环境和长期强烈的人类活动,切沟侵蚀对流域产沙有非常重要的贡献。我国大多数地区,以切沟为主的沟谷产沙占流域产沙总量的一半以上^[59]。在黄土高原丘陵沟壑区,切沟侵蚀产沙量占流域产沙量的 50% 以上,在高原沟壑区,切沟侵蚀产沙量占流域产沙量的 80% 以上;在东北黑土漫岗丘陵区 and 南方红壤丘陵区切沟侵蚀也对流域侵蚀产沙有重要贡献(图 3)。过去数十年针对切沟侵蚀的研究主要集中在对切沟形态的描述、切沟发展阶段的划分、切沟发展的主要方式、切沟侵蚀的影响因素、切沟侵蚀预报模型等。



(a) 美国



(b) 黄土高原



(c) 东北黑土区



(d) 南方红壤丘陵区

图 3 切沟侵蚀

Fig. 3 Images of gully erosion

2.1 切沟与浅沟的区别

除切沟几何形态与浅沟几何形态有较大区别外,切沟与浅沟的最大区别一是浅沟没有明显的沟缘,而切沟有明显沟缘,其横断面呈 V 型或 U 型;二是切沟阻碍耕作,而浅沟不阻碍耕作;三是浅沟与切沟的形成过程明显不同,浅沟形成过程受集中水流冲刷和人类耕作的双重影响,而切沟侵蚀主要受集中水流冲刷的影响;四是二者的发生部位不同。但切沟侵蚀主要方式与浅沟侵蚀过程相同,包括沟头溯源侵蚀、沟壁崩塌和沟底下切 3 个子过程。

2.2 切沟发展阶段划分与切沟发展的主要方式

切沟发展包括 2 个阶段,第 1 阶段占切沟生命的 5%,是在降雨后,随着物质迁移,出现沟口(产生

1 个梯形沟横断面),切沟形态特征(长、深、宽)很不稳定,沟道快速形成,系统在这一阶段迅速发展;第 2 阶段是切沟发展的稳定阶段,占切沟生命的大部分,这一阶段沿沟床侵蚀和沉积都很微弱,沟底和沟壁形态稳定。SIDORCHUK^[60]对俄罗斯 Yamal 地区和澳大利亚 Yass 地区的切沟侵蚀研究发现,占切沟长度 80%、切沟面积 50% 和切沟体积 35% 的切沟是在占切沟生命为 5% 的时间内形成的,即切沟的形成过程比较迅速;而切沟形成后,切沟发展过程则相对较慢。MAJID^[61]通过对切沟发展时的主要水文过程和侵蚀过程研究表明切沟长度随时间呈指数发展,这就意味着一定时间后切沟长度就达到了稳定状态。

由于切沟的形成条件不尽相同,所以切沟发展方式差异较大。大多数斜坡切沟最初以槽形断面出现,并有多级跌水;在发展过程中,这些跌水不断下切侵蚀和溯源侵蚀。当切沟深度发展到一定时,出现沟壁崩塌,形成沟床崩积物。由于崩积物非常松散,使下一次侵蚀过程多以陷穴侵蚀的方式进行,这些陷穴侵蚀被认为是切沟侵蚀一个主要过程。景可^[59]认为切沟侵蚀发展的方式主要有:①沟头的溯源侵蚀,沟头前进是切沟发展的主要方式之一。②沟坡的横向侵蚀发展,主要方式是泻溜、崩塌和滑坡。③垂向的下切侵蚀,在其它条件相同的情况下,切沟下切侵蚀的强度取决于水流侵蚀能量。BOCCO等^[62-63]认为潜蚀是切沟形成和发展的最重要形式之一;ROBERSON等^[64-65]认为溯源侵蚀是切沟发展的主要方式之一。MAJID^[61]通过对切沟侵蚀过程的监测结果表明,切沟的发展是受到一系列过程作用的,其中包括渗漏、土壤蠕动、塌方和冲刷。沿切沟发生的侵蚀形态和空间分布规律表明,有2种水文过程在切沟发展过程中非常重要,即渗漏和地表径流。而且,沟头下切侵蚀的主要过程是渗漏,地表径流则是维持沟头溯源侵蚀的必要过程。

2.3 切沟发生的临界条件

李斌兵等^[24]通过GPS实测数据并结合GIS空间分析与统计回归方法,建立了适用于黄土高原丘陵区的发生切沟侵蚀临界模型($SA^{0.1351} > 1.9648$),发现在黄土高原丘陵沟壑区,随着坡度的增大,发生切沟侵蚀的临界值增大。同时临界模型的验证结果表明,基于所建临界模型提取的浅沟侵蚀分布区与野外实际相吻合,即切沟侵蚀主要发生在大于 35° 的沟坡地上,其分布面积占整个沟坡面积的93%。

2.4 切沟侵蚀影响因素

影响切沟侵蚀的主要因素有降雨、地形、地面物质组成、土层厚度、土地利用及人类活动等。比利时中部的研究表明,降雨格局的改变会导致沟蚀占总侵蚀产沙量比例的改变^[66]。伍永秋等^[67]通过坡长对切沟发生的影响研究表明,切沟发育需要足够的径流量,而径流的横向集中有限,只有坡长增加才能达到所需条件。通过在航片上量测,陕北丘陵区目前不发生切沟的平均坡长为74.4 m,此值大于目前切沟沟头到分水岭的距离64.5 m,也就是说一旦切沟沟头形成,则易于溯源侵蚀。DEOLIVEIRA^[68]研究了坡度和坡形对切沟的影响表明,在坡面上,切沟常常在中段坡度最陡处出现,有的甚至在中间出现切沟,而下部却是浅沟侵蚀。这是坡度大,径流下切能力突然增大的原因。土壤类

型及土层厚度的变化同样会对沟蚀过程以及沟蚀占总侵蚀量比例有很大影响^[69],而土地利用及人类活动的存在则可在很大程度上改变切沟侵蚀过程^[70]。目前有关降雨、汇水面积、汇水流量及其汇水含沙浓度对切沟侵蚀影响的研究非常薄弱,有待进一步研究和加强。

2.5 切沟侵蚀预报模型

SIDORCHUK等^[71]于1998年建立了模拟切沟发展第一阶段的三维水力学GULTEM模型。该模型输出的是沟深(Gully depth)、沟宽(Gully width)和沟的体积(Gully volume),但最终的沟长必须提前指定,而且不能模拟沟头溯源侵蚀。1999年,SIDORCHUK^[72]又提出了动态切沟模型DIMGUL(Dynamic gully model)和静态切沟模型STABGUL(Static gully model)。DIMGUL是模拟切沟发展第一时期的切沟形态快速变化的动态模型,它基于物质守恒和沟床形变方程,其中直坡稳定性方程用于预报沟壁倾斜。STABGUL是计算最终稳定切沟形态参数的静态模型,它基于切沟最终形态平衡的设想,高程和沟底宽度多年平均不变。STABGUL中认为这种稳定性与沟底的侵蚀和沉积之间以一种微弱的比率相联系,这就意味着径流速度低于侵蚀初期的开始值,但大于流水冲刷搬运泥沙的临界速度。当然要准确地预报切沟侵蚀,还需要做更多切沟侵蚀过程和机理的研究。

综上所述,近年来有关切沟侵蚀的研究取得了一定的成果,加深了人们对切沟侵蚀发生发展过程及其防治的认识,也为切沟侵蚀危害性评价提供了一定的依据。但由于切沟侵蚀过程的复杂性以及研究方法的局限,目前切沟侵蚀过程的定量研究、切沟发生的临界地形和动力条件、切沟发育过程的定量描述、切沟水流的剥离方程及泥沙搬运能力、包括切沟侵蚀的流域侵蚀预报模型、动态监测切沟侵蚀过程的新方法等研究还相对薄弱。

3 沟蚀研究方法与技术

沟蚀量的精确量测一直是沟蚀发育过程研究的重点。但由于沟蚀形态复杂且不规则,传统的沟蚀测量方法不能满足目前对侵蚀过程及机理的研究需求,因此必须结合现代科技发展引入新的沟蚀研究方法和技术。

3.1 有关沟蚀研究的传统测量方法

3.1.1 填土法与体积测量法

填土法/体积置换法是一种精确测量小范围坡面土壤侵蚀量的传统方法,其基本原理是将一定体积与原坡面土壤完全一致的土称其质量,然后把待

测坡面的所有侵蚀沟按相同容重填满,坡面沟蚀量即充填土的总质量减去含水总质量。由于侵蚀沟的深和宽在坡面上的分布比较复杂且横断面形状变化多样,因此,与体积测量法相比,填土法具有估算沟蚀量精确之优点^[73]。DONG 等^[74]对填土法进行了改进,将泡沫聚苯乙烯颗粒回填坡面浅沟沟槽以获取浅沟体积,再乘以土壤容重计算沟蚀量。然而,无论用何种材料回填坡面,该法均需备土或备料,且需进行土壤含水率和土壤容重的测定,因而较难满足野外大范围沟蚀调查的需要。

侵蚀沟体积测量法是通过人工测量侵蚀沟的长、宽、深,计算侵蚀沟体积,乘以土壤容重得出沟蚀量的土壤侵蚀监测方法。该方法原理简单,操作过程易于掌握,仅需测尺作为其测量工具,因此被广泛应用于野外和室内坡面土壤侵蚀试验中^[75-78]。然而,由于坡面侵蚀沟分布复杂且横断面类型多样,且在具体量测时,测量人员又很难完全做到水平读数,因此该法的测量精度较低。为改进该方法的准确性和适用性,众多学者进行了大量的探索和应用,郑粉莉^[73]提出了用侵蚀沟体积测量法监测野外坡面沟蚀量的方法,并给出了估算沟蚀量的方程式;CASALI 等^[79]提出了等效棱柱沟(EPG)的概念,并尝试将复杂的侵蚀沟概化为棱柱,以此估算沟蚀量。

3.1.2 地形测针法

地形测针法通过观察测针的高低起伏变化,获取地表糙度和侵蚀沟形态,是坡面沟蚀监测的一种可靠方法,由于该方法操作简便、易于掌握且实用性强,得到了许多学者的认可^[80-84]。研究者^[80-81, 84]在每次侵蚀性降雨后,利用测针法测量地面地形数据,动态监测坡面沟蚀发育与坡面侵蚀形态变化过程,通过数字高程模型(DEM)和次降雨前后坡面三维立体图的制作,模拟了坡面侵蚀形态的演变过程。地形测针法能较好地监测坡面沟蚀发育过程并估算沟蚀量,是一种值得推广的土壤侵蚀监测方法,但由于该法测量的数据量较大,因此仅对小型的模拟试验表现较好,对野外大范围沟蚀发育过程的监测则仅能用作其它监测方法的补充测量。

3.2 有关沟蚀研究的高新技术测量方法与技术

3.2.1 摄影测量技术

摄影测量技术通过对多幅摄影影像相互重叠的部分进行交互编译,最终获得高精度的数字高程模型(DEM)^[85]。在生产实践中,监测人员通过对比土壤侵蚀发生前后监测对象的 DEM 数据,提取坡度、坡向、地表割裂度等地貌特征,估算监测对象的土壤侵蚀量和沉积量。1984 年,我国首次将摄影测量技术运用在沟蚀研究中^[86],近年来,国外众多学

者利用立体摄影技术,在侵蚀沟发育过程与形态模拟,坡面侵蚀沉积预测和切沟沟壁崩塌等方面进行了大量探索,取得了一批前瞻性成果^[87-89]。摄影测量技术因其测量速度快、精度高、非接触且具有传统土壤侵蚀监测方法不可替代的优势,正被越来越多的学者所重视。

3.2.2 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是一种利用激光测距原理确定目标空间位置的新型测量方法^[90-91],又称为“实景复制技术”^[92]。该技术通过获取不同时期坡面的 DEM,对比不同时期坡面三维图像的差异,获得不同时间段内坡面土壤侵蚀、沉积分布特征^[90]。与传统测量手段相比,三维激光扫描技术具有快速、不接触、实时动态和高精度等特点^[84, 90-91, 93]。进入 21 世纪,以三维激光扫描技术为代表的激光测距技术取得了跨越式的发展,科研人员在侵蚀沟形态演变(沟头溯源侵蚀、沟壁崩塌侵蚀、沟底下切侵蚀)以及坡面侵蚀、沉积空间分布等方面取得了丰富的资料,节省了大量的人力、物力和财力^[90-91, 93-95]。

3.2.3 GPS 技术

高精度 GPS(RTK)是实时处理两个测站载波相位的差分信号,通过基站与流动站接收机的无线信号传输,实现厘米级三维定位精度的现代测量方法。该技术以其作业速度快、精度高、不受恶劣天气影响等优点越发受到水土保持工作者的重视和欢迎。近年来,高精度 GPS 已被广泛运用于沟蚀发育过程研究,在人工模拟降雨条件下实现了坡面侵蚀沟发育过程的实时动态监测^[96],在野外也实现了不同时间尺度的连续原位观测(从次降雨尺度到年尺度)^[97-100]。学者们通过对比不同时相的 DEM 来获取监测时段内沟头溯源、沟底下切和沟壁扩张的动态变化,估算切沟侵蚀量,并达到了较高的估算精度^[96]。

3.2.4 无人机遥测技术

无人机(UAV)作为低空摄影测量的遥感平台,现正被逐步运用在沟蚀监测实践中。该技术通过架设在无人机上的数码相机对地面快速连续拍摄高分辨率照片,并在专业处理软件中(如 Photomodeler、PhotoScan、APER0/MICMAC 和 PixelGrid 等)提取、解译多幅照片的重叠部分,最终获取点云数据,建立 DEM^[101-102]。与传统摄影测量相比,该技术具有拍照速度快、测量范围广、能在复杂地形条件下作业等特点^[103-105]。然而,由于无人机在飞行过程中较难根据地形实时调整飞行高度和角度,从而易在复杂地形区域(较陡的沟壁边坡和内凹的切沟沟头)形成数据缺失,造成测量误差,因此需要通过三维扫描

或地面摄影测量进行局部补测^[103]。

4 沟蚀过程研究展望

综上所述,尽管沟蚀的研究取得了一定的研究成果,加深了人们对沟蚀发生发展过程的认识,也为切沟侵蚀危害性评价提供了一定的依据。但由于沟蚀过程的非线性、突发性等特点,同片蚀和细沟侵蚀过程相比,沟蚀过程研究仍很薄弱,至今尚未有公认的沟蚀过程定量表达式,致使现有的较广泛应用的侵蚀预报模型尚不能预报沟蚀量,因此,迫切需要加强沟蚀过程的研究。建议今后沟蚀过程的研究重点有:

(1)沟蚀监测方法的标准化和规范化研究:
①建立国家沟蚀观测小区或沟蚀观测集水区的标准与规范。②建立摄影测量技术、三维激光扫描技术、GPS技术和无人飞机遥测技术动态监测沟蚀过程的标准与规范。③次降雨事件沟蚀过程动态监测方法研究。

(2)沟蚀过程中沟溯源侵蚀、沟壁崩塌和沟底下切过程的定量表达:①沟蚀过程坡面水流水力学参数测量方法研究。②沟蚀发育不同阶段主导侵蚀过程的水动力学机理研究。③沟蚀发育不同阶段溯源侵蚀、沟壁崩塌侵蚀和下切侵蚀的定量表达式建立。

(3)浅沟和切沟侵蚀的泥沙输移连续方程:
①浅沟侵蚀和切沟侵蚀的泥沙搬运能力的定量表达。②沟蚀过程中潜流泥沙搬运能力研究。③浅沟和切沟侵蚀的泥沙输移连续方程研究。

(4)包含浅沟侵蚀的坡面侵蚀预报模型和包含沟蚀流域侵蚀预报模型:①浅沟侵蚀速率估算模型。②沟蚀发育不同阶段侵蚀速率估算模型。③包含浅沟侵蚀的坡面侵蚀预报模型。④包含切沟侵蚀的流域侵蚀预报模型。

(5)沟蚀防治技术研究:①土地利用变化与沟蚀发育过程。②沟蚀防治的新技术研究。③沟蚀防治的新材料与新工艺研究。

参 考 文 献

- 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99-115.
ZHU Xianmo. Classification on the soil erosion in the loess region [J]. Acta Pedologica Sinica, 1956, 4(2): 99-115. (in Chinese)
- FOSTER G R. Understanding ephemeral gully erosion[J]. Soil Conservation, 1986, 2: 90-125.
- 中国农业百科全书土壤卷编委会. 土壤侵蚀与水土保持分支部目[M]. 北京: 农业出版社, 1996.
- 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.
CHEN Yongzong. The classification of gully in hilly loess region in the middle reaches of the Yellow River [J]. Scientia Geographica Sinica, 1984, 4(4): 321-327. (in Chinese)
- 龚时扬. 黄河流域黄土高原土壤侵蚀的特点[J]. 中国水土保持, 1988(9): 8-10.
GONG Shiyang. Particular features of soil erosion on the Loess Plateau of the Yellow River valley [J]. Soil and Water Conservation in China, 1988(9): 8-10. (in Chinese)
- 黄秉维. 陕甘黄土区域土壤侵蚀的因素和方式[J]. 地理学报, 1953, 20(2): 1-5.
- 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训[J]. 科学通报, 1955(12): 15-21.
- 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 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, 1: 9-18.
- 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J]. 地理学报, 1956, 23(3): 201-222.
LUO Laixing. A tentative classification of landforms in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 1956, 23(3): 201-222. (in Chinese)
- 罗来兴. 黄土高原典型沟道流域侵蚀地貌与水土保持关系论丛[M]. 北京: 科学出版社, 1958.
- 席承藩, 程云生, 黄直立. 陕北绥德韭园沟土壤侵蚀情况及水土保持办法[J]. 土壤学报, 1953, 2(3): 148-166.
- 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报, 1982, 2(3): 36-41.
- 承继成. 中国地理学会1963年年会论文集(地貌)[C]. 北京: 科学出版社, 1965.
- 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵地区坡地的侵蚀发育[G]//中国科学院地理研究所. 地理集刊. 第10号. 北京: 科学出版社, 1976, 10: 44-47.
- 甘枝茂. 黄土地貌的垂直变化与水土保持措施的布设[J]. 人民黄河, 1980(3): 57-59.
- ZHENG Fenli, HUANG Chihua. Gully erosion [M] // Rattan L. Encyclopedia of Soil Science. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002: 630-634.
- 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(3-4): 377-392.
- VANDAELE K, POESEN J, GPVERS G, et al. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision [J]. Geomorphology, 1996, 16(2): 161-173.
- VANDEKERCKHOVE L, POESEN J, OOSTWOUND D, et al. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean

- Europe[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(1): 1201–1220.
- 20 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(3–4): 283–306.
- 21 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 ASAE*, 1988, 31(4): 1098–1107.
- 22 VANWALLEGHEM T, POESEN J, NACHTERGAELE J, et al. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils[J]. *Geomorphology*, 2005, 69(1): 76–91.
- 23 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.
ZHANG Keli, TANG Keli, WANG Binke. A study on characteristic value of shallow gully erosion on slope farmland in the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 5(2): 8–13. (in Chinese)
- 24 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.
LI Binbing, ZHENG Fenli, ZHANG Peng, et al. Geomorphic threshold determination for ephemeral gully and gully erosion areas in the loess hilly gully region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(5): 16–20. (in Chinese)
- 25 丁晓斌, 郑粉莉, 王彬, 等. 子午岭地区坡面浅沟侵蚀临界模型研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(3): 122–125
DING Xiaobin, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al. Predicting ephemeral gully erosion on hillslopes of Ziwuling area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(3): 122–125. (in Chinese)
- 26 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.
HU Gang, WU Yongqiu, LIU Baoyuan, et al. Geomorphic threshold model for ephemeral gully incision in rolling hills with black soil in northeastern China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 449–454. (in Chinese)
- 27 TORRI D, POESEN J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 73–85.
- 28 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.
- 29 张科利. 浅沟发育对土壤侵蚀作用的研究[J]. *中国水土保持*, 1991(4): 17–19.
ZHANG Keli. Study on the effects of shallow gully development on soil erosion[J]. *Soil and Conservation in China*, 1991(4): 17–19. (in Chinese)
- 30 姜永清, 王占礼, 胡光荣, 等. 瓦背状浅沟分布特征分析[J]. *水土保持研究*, 1999, 6(2): 181–184.
JIANG Yongqing, WANG Zhanli, HU Guangrong, et al. Distribution features of shallow gully[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(2): 181–184. (in Chinese)
- 31 秦伟, 朱清科, 赵磊磊, 等. 基于 RS 和 GIS 的黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀地形特征研究[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 58–64.
QIN Wei, ZHU Qingke, ZHAO Leilei, et al. Topographic characteristics of ephemeral gully erosion in loess hilly and gully region based on RS and GIS[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 58–64. (in Chinese)
- 32 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.
ZHANG Keli. A study on the distribution of erosion and sediment yield on the loess slope and the relationship between the distribution and rain characteristics[J]. *Journal of Sediment Research*, 1991(4): 39–47. (in Chinese)
- 33 CAPRA A, PORTO P, SCICOLONE B. Relationships between rainfall characteristics and ephemeral gully erosion in a cultivated catchment in Sicily (Italy)[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(1): 77–87.
- 34 郑粉莉, 康绍忠. 黄土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.
ZHENG Fenli, KANG Shaozhong. Erosion and sediment yield in different zones of loess slopes[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(5): 422–428. (in Chinese)
- 35 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.
- 36 WILSON G. Understanding soil pipe flow and its role in ephemeral gully erosion[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(15): 2354–2364.
- 37 WILSON G V, CULLUM R F, ROMKENS M J M. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe [J]. *CATENA*, 2008, 73(1): 98–106.
- 38 WILSON G V, RIGBY J R, DABNEY S M. Soil pipe collapses in a loess pasture of Goodwin Creek watershed, Mississippi: role of soil properties and past land use[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(11): 1448–1463.
- 39 张科利. 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.
- 40 王文龙, 雷阿林, 李占斌. 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
WANG Wenlong, LEI Alin, LI Zhanbin. Study on dynamic mechanism of rills shallow furrows and gully in the soil erosion chain [J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(4): 471–475. (in Chinese)
- 41 王占礼, 邵明安. 黄土丘陵沟壑区第二副区山坡地土壤侵蚀特征研究[J]. 1998, 5(4): 11–21, 97
WANG Zhanli, SHAO Ming'an. Soil erosion characters of slope land in the 2nd sub-region of Loess Plateau[J]. 1998, 5(4): 11–21, 97. (in Chinese)
- 42 WISCHMEIER W H. Use and misuse of the universal soil loss equation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1976,

- 31(1):5-9.
- 43 MEYER L D. Evolution of the universal soil loss equation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1984, 39(2): 99-104.
- 44 RENARD D K, FOSTER D G, WEESIES A G. Prediction soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]//US Department of Agriculture USDA-ARS Agricultural Handbook No. 703. 1976
- 45 NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA—water erosion prediction project technology[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(5): 1587-1593.
- 46 WOODWARD D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion[J]. *CATENA*, 1999, 37(3): 393-399.
- 47 CAPRA A, MAZZARA L M, SCICOLONE B. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy [J]. *CATENA*, 2005, 59(2): 133-146.
- 48 VALCARCEL M, TABOADA M T, PAZ A, et al. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain[J]. *CATENA*, 2003, 50(2): 199-216.
- 49 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.
- 50 NACHTERGAELE J, POESEN J, SIDORCHUK A, et al. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(10): 1935-1953.
- 51 DAGGUPATI P, SHESHUKOV A Y, DOUGLAS-MANKIN K R. Evaluating ephemeral gullies with a process-based topographic index model[J]. *CATENA*, 2014, 113: 177-186.
- 52 GORDON L M, BENNETT S J, BINGNER R L, et al. Simulating ephemeral gully erosion in AnnAGNPS[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 857-866.
- 53 TAGUAS E V, YUAN Y, BINGNER R L, et al. Modeling the contribution of ephemeral gully erosion under different soil managements: a case study in an olive orchard microcatchment using the AnnAGNPS model[J]. *CATENA*, 2012, 98: 1-16.
- 54 LI H, CRUSE R M, BINGER R L, et al. Evaluating ephemeral gully erosion impact on *Zea mays* L. yield and economics using AnnAGNPS[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 157-165.
- 55 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究[J]. *泥沙研究*, 2005(4): 1-6.
JIANG Zhongshan, ZHENG Fenli, WU Min. Prediction model of water erosion on hillslope[J]. *Journal of Sediment Research*, 2005(4): 1-6. (in Chinese)
- 56 PIEST R F, SPOMER R C. Sheet and gully erosion in the Missouri valley loessial region[J]. *Transactions of ASAE*, 1968, 11(6): 850-853.
- 57 PIEST R F, BRADFORD J M, SPOMER R G. Mechanism of erosion and sediment movement from gullies[M]//USDA. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, ARS-S-40. ARS-USDA, 1975: 162-176.
- 58 POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. *CATENA*, 2003, 50(2): 91-133.
- 59 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究[J]. *地理科学*, 1986, 6(4): 340-347.
JING Ke. A study on gully erosion on the Loess Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1986, 6(4): 340-347. (in Chinese)
- 60 SIDORCHUK A. Dynamic and static models of gully erosion[J]. *CATENA*, 1999, 37(3): 401-414.
- 61 MAJID Soufi. 澳大利亚一个林地环境下的切沟发展过程和侵蚀趋势研究[J]. *中国水土保持*, 2002(7): 26-27.
- 62 BOCCO G. Gully erosion: processes and models[J]. *Progress in Physical Geography*, 1991, 15(4): 392-406.
- 63 MARTIN Z, PENELA A J. Pipe and gully systems development in the Almanzora Basin (Southeast Spain)[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1994, 38(2): 207-222.
- 64 ROBERSON K M, HANSON G J. Large scale headcut erosion testing[J]. *Transactions of ASAE*, 1995, 38(2): 429-434.
- 65 ROBERSON K M, HANSON G J. Gully headcut advance[J]. *Transactions of ASAE*, 1996, 39(1): 33-38.
- 66 POESEN J W, BOARDMAN J, WILCOX B, et al. Water erosion monitoring and experimentation for global change studies[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(5): 386-390.
- 67 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, 8(2): 134-142.
WU Yongqiu, LIU Baoyuan. Gully, gully erosion and prediction[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2000, 82(2): 134-142. (in Chinese)
- 68 DEOLIVERIRA M A T. Slope geometry and gully erosion development: Bananal, São Paulo, Brazil [J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1990, 34(4): 423-434.
- 69 EVANS R. On assessing accelerated erosion of arable land by water[J]. *Soils and Fertilizers*, 1993, 56(11): 1285-1293.
- 70 POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. *CATENA*, 2003, 50(2): 91-133.
- 71 SIDORCHUK Aleksey, SIDORCHUK Anna. Model for estimating gully morphology[M]//IAHS Publication, 1998: 333-343.
- 72 SIDORCHUK A. Dynamic and static models of gully erosion[J]. *CATENA*, 1999, 37(3): 401-414.
- 73 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. *水土保持通报*, 1989, 9(4): 41-47.
ZHENG Fenli. A research on method of measuring rill erosion amount[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1989, 9(4): 41-47. (in Chinese)

- 74 DONG Y, LI F, ZHANG Q, et al. Determining ephemeral gully erosion process with the volume replacement method[J]. CATENA, 2015, 131: 119–124.
- 75 BRYAN R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope[J]. Geomorphology, 2000, 32(3): 385–415.
- 76 REJMAN J, BRODOWSKI R. Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30(2): 231–239.
- 77 郑粉莉, 武敏, 张玉斌, 等. 黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 438–442.
ZHENG Fenli, WU Min, ZHANG Yubin, et al. Ephemeral gully development process at loess steep hillslope[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 438–442. (in Chinese)
- 78 SHEN H, ZHENG F, WEN L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology[J]. Geomorphology, 2015, 231: 193–201.
- 79 CASALI J, GIMENEZ R, CAMPO-BESCOS M A. Gully geometry: what are we measuring? [J]. Soil, 2015, 1(2): 509–513.
- 80 张永东, 吴淑芳, 冯浩, 等. 黄土陡坡细沟侵蚀动态发育过程及其发生临界动力条件试验研究[J]. 泥沙研究, 2013(2): 25–32.
ZHANG Yongdong, WU Shufang, FENG Hao, et al. Experiment study of rill dynamic development process and its critical dynamic conditions on loess slope[J]. Journal of Sediment Research, 2013(2): 25–32. (in Chinese)
- 81 韩鹏, 倪晋仁, 李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 115–125.
HAN Peng, NI Jinren, LI Tianhong. Headcut and bank landslip in rill evolution[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(2): 115–125. (in Chinese)
- 82 MIERNECKI M, WIGNERON J, LOPZ-BAEZA E, et al. Comparison of SMOS and SMAP soil moisture retrieval approaches using tower-based radiometer data over a vineyard field[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 154: 89–101.
- 83 FERNANDEZ-MORAN R, WIGNERON J P, LOPEZ-BAEZA E, et al. Roughness and vegetation parameterizations at L-band for soil moisture retrievals over a vineyard field[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 170: 269–279.
- 84 张鹏. 沟蚀发育过程动态监测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- 85 WELLS R R, MOMM H G, BENNETT S J, et al. A measurement method for rill and ephemeral gully erosion assessments[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(1): 203–214.
- 86 周佩华, 徐国礼, 鲁翠瑚, 等. 黄土高原的侵蚀沟及其摄影测量方法[J]. 水土保持通报, 1984(5): 38–43.
- 87 WELLS R R, MOMM H G, RIGBY J R, et al. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows [J]. CATENA, 2013, 101: 114–121.
- 88 GESSESSE G D, FUCHS H, MANSBERGER R, et al. Assessment of erosion, deposition and rill development on irregular soil surfaces using close range digital photogrammetry[J]. The Photogrammetric Record, 2010, 25(131): 299–318.
- 89 BERGER C, SCHULZE M, RIEKE-ZAPP D, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456–1467.
- 90 VINCI A, BRIGANTE R, TODISCO F, et al. Measuring rill erosion by laser scanning[J]. CATENA, 2015, 124: 97–108.
- 91 MILAN D J, HERITAGE G L, HETHERINGTON D. Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(11): 1657–1674.
- 92 郑粉莉, 张鹏, 王彬. 利用三维激光扫描技术动态监测坡面尺度侵蚀发育过程的研究方法: 中国 CN101793543[P]. 2010–08–04.
- 93 PERROY R L, BOOKHAGEN B, ASNER G P, et al. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California[J]. Geomorphology, 2010, 118(3–4): 288–300.
- 94 JAMES L A, WATSON D G, HANSEN W F. Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA[J]. CATENA, 2007, 71(1): 132–144.
- 95 EVANS M, LINDSAY J. High resolution quantification of gully erosion in upland peatlands at the landscape scale[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(8): 876–886.
- 96 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): 368–406.
ZHANG Peng, ZHENG Fenli, CHEN Jiqiang, et al. Application of high-precision GPS to dynamic monitoring gully erosion processes[J]. Tropical Geography, 2009, 29(4): 368–406. (in Chinese)
- 97 SHELLBERG J G, SPENCER J, BROOKS A P, et al. Degradation of the Mitchell River fluvial megafan by alluvial gully erosion increased by post-European land use change, Queensland, Australia[J]. Geomorphology, 2016, 266: 105–120.
- 98 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探——以东北漫川漫岗黑土区为例[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 16–19.
HU Gang, WU Yongqiu, LIU Baoyuan, et al. Preliminary research on short-term channel erosion using GPS and GIS[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4): 16–19. (in Chinese)
- 99 CHOI K, HONG C M, KIM M H, et al. Morphologic evolution of macrotidal estuarine channels in Gomso Bay, west coast of Korea: Implications for the architectural development of inclined heterolithic stratification[J]. Marine Geology, 2013, 346: 343–354.

- ZHOU Peihua. Discussion on mechanism of loess erosion[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4(5): 40–46. (in Chinese)
- 22 王思远,王光谦,陈志祥. 黄河流域土地利用与土壤侵蚀的耦合关系[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(1): 32–37.
WANG Siyuan, WANG Guangqian, CHEN Zhixiang. Relationship between land use and soil erosion in Yellow River Basin[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(1): 32–37. (in Chinese)
- 23 高照良,付艳玲,张建军,等. 近50年黄河中游流域水沙过程及对退耕的响应[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 99–105.
GAO Zhaoliang, FU Yanling, ZHANG Jianjun, et al. Responses of streamflow and sediment load to vegetation restoration in catchments on the Loess Plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(6): 99–105. (in Chinese)
- 24 方海燕,蔡强国,陈浩,等. 黄土丘陵沟壑区岔巴沟下游泥沙传输时间尺度动态研究[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 77–87.
FANG Haiyan, CAI Qiangguo, CHEN Hao, et al. Research on the dynamics of temporal sediment transport in a gullied loess basin: the lower Chabagou creek on the Loess Plateau[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(5): 77–87. (in Chinese)
- 25 廖义善,卓慕宁,李定强,等. 基于GIS黄土丘陵沟壑区分布式侵蚀产沙模型的构建——以蛇家沟小流域为例[J]. *泥沙研究*, 2012(1): 7–13.
LIAO Yishan, ZHUO Muning, LI Dingqiang, et al. A GIS-based distributed soil erosion and sediment yield model for typical watersheds in hilly loess areas: a case study in Shejiagou catchment [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(1): 7–13. (in Chinese)
- 26 蔡强国,刘纪根,刘前进. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型[J]. *地理研究*, 2004, 23(4): 433–439.
CAI Qiangguo, LIU Jigen, LIU Qianjin. Research of sediment yield statistical model for single rainstorm in Chabagou drainage basin [J]. *Geographical Research*, 2004, 23(4): 433–439. (in Chinese)
- 27 崔灵周,李占斌,郭彦彪,等. 基于分形信息维数的流域地貌形态与侵蚀产沙关系[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 197–203.
CUI Lingzhou, LI Zhanbin, GUO Yanbiao, et al. Fractal-information-dimension-based relationship between sediment yield and topographic feature of eatershed[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 197–203. (in Chinese)
- 28 廖义善,蔡强国,卓慕宁,等. 不同时空尺度下沟壑对流域侵蚀产沙的影响——以黄土丘陵沟壑区岔巴沟流域为例[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 47–54.
LIAO Yishan, CAI Qiangguo, ZHUO Muning, et al. Influence of channel networks on the sediment yield under variant temporal and spatial scales: a case study of Chabagou watershed[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(1): 47–54. (in Chinese)
- 29 杨涛,张鹰,陈界仁,等. 基于数字平台的黄河多沙粗沙区分布式水文模型研究——以黄河岔巴沟流域为例[J]. *水利学报*, 2005, 35(4): 456–460.
YANG Tao, ZHANG Ying, CHEN Jieren, et al. Study on distributed hydrologic model in Chabagou basin of Yellow River based on digital platform[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 35(4): 456–460. (in Chinese)
- 30 陈晓安,蔡强国,郑明国,等. 岔巴沟流域次暴雨坡面土壤侵蚀经验模型[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(3): 325–329.
CHEN Xiao'an, CAI Qiangguo, ZHENG Mingguo, et al. Empirical soil erosion model for single rainstorm in Chabagou drainage basin[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(3): 325–329. (in Chinese)
- 31 方海燕,蔡强国,李秋艳. 黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究[J]. *地理研究*, 2009, 28(3): 583–591.
FANG Haiyan, CAI Qiangguo, LI Qiuyan. Study on the runoff generation capacity of slope surface and its influencing factors in a hilly loess region on the Loess Plateau[J]. *Geographical Research*, 2009, 28(3): 583–591. (in Chinese)
- 32 ZHENG M, LI R, HE J. Sediment concentrations in run-off varying with spatial scale in an agricultural subwatershed of the Chinese Loess Plateau[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(26): 5414–5423.
- 33 XU J. Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China[J]. *CATENA*, 1999, 36(1–2): 1–19.

(上接第59页)

- 100 FULLER I C, MARDEN M. Slope-channel coupling in steepland terrain: a field-based conceptual model from the Tarndale gully and fan, Waipaoa catchment, New Zealand[J]. *Geomorphology*, 2011, 128(3–4): 105–115.
- 101 BRASINGTON J, LANGHAM J, RUMSBY B. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport[J]. *Geomorphology*, 2003, 53(3–4): 299–316.
- 102 PETER K D, DOLEIRE-OLTMANN S, RIES J B, et al. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data[J]. *CATENA*, 2014, 113: 24–40.
- 103 STOCKER C, ELTNER A, KARRASCH P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry: a case study from Andalusia, Spain[J]. *CATENA*, 2015, 132: 1–11.
- 104 ELTNER A, BAUMGART P, MAAS H, et al. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(6): 741–755.
- 105 NEUGIRG F, KAISER A, SCHMIDT J, et al. Quantification, analysis and modelling of soil erosion on steep slopes using LiDAR and UAV photographs[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 367: 51–58.