

细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展

李君兰^{1,2}, 蔡强国^{1,3}, 孙莉英¹, 陈晓安^{1,4}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 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, 杨凌 712100; 4. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要:细沟侵蚀是坡耕地时常发生的一种侵蚀形式。细沟侵蚀对坡面土壤侵蚀产沙有重要贡献,而且是坡面侵蚀由面蚀向沟蚀发展的过渡。本文分析了细沟侵蚀影响因素和临界条件研究取得的进展和存在的不足。影响细沟侵蚀的主要因素有降雨径流、土壤、地形、土壤表面特征和土地管理等因素,其中,前4者有多种指标来表征其效应,而土壤表面特征的影响还处于定性研究阶段。坡面需要达到特定的临界条件才可能发育细沟,细沟发生临界条件的研究主要从临界径流条件、临界土壤条件和临界地形条件等角度出发,各临界条件并非定值,而是关乎其他因素的综合指标。最后,本文对今后细沟侵蚀影响因素和临界条件研究可能的研究内容和方向进行了展望。

关键词:细沟侵蚀;影响因素;临界条件;土壤特征

1 引言

细沟侵蚀过程是降雨径流形成的片流向下坡汇集逐渐转变为细沟流进行侵蚀的过程^[1],这种细小的沟道可被正常的耕作活动填平^[2]。一般来说,细沟侵蚀的沟深和沟宽均不超过20 cm,侵蚀的都是坡面表层肥沃土壤,因此,细沟侵蚀是面蚀的一种。大量研究表明,细沟侵蚀的发育使得坡面侵蚀量产生了量的飞跃。Meyer等^[3]在野外粉砂壤小区试验中观测到,细沟产生后,土壤侵蚀量增加了两倍。细沟侵蚀是黄土高原坡耕地土壤侵蚀的主要方式之一,细沟侵蚀量对坡面侵蚀量的贡献能够达到70%以上,占总侵蚀的1/2左右^[4-5]。细沟的产生也标志着坡面的主要侵蚀形式逐渐发生变化,细沟一旦产生,坡面径流的侵蚀力与搬运力均会远大于雨滴击溅和坡面片状水流所具有的侵蚀力和搬运力^[6]。细沟侵蚀是坡面侵蚀机理预报研究中的重要组成部分^[7]。Foster等^[8]和Meyer等^[9]依据坡面侵蚀原理和泥沙输移的连续性将坡面降雨径流侵蚀分为细沟间侵蚀和细沟侵蚀两部分。基于Foster的思想,美国提出的WEPP模型对细沟间和细沟侵蚀的物理描述^[10-11]。

细沟侵蚀研究不仅对防治坡面土壤侵蚀,发展农业生产有重要意义,而且能够促进土壤侵蚀预报模型的建立发展。坡面细沟侵蚀产沙过程非常复杂,其研究成果丰富多样,受多种因素的影响和限制;但是部分因素还处于定性阶段,还存在一些待深入的领域。另外,因自然条件的差异,细沟发育的临界条件并非定值,而是综合性的指标,现有的研究成果大多是针对某一环境下的特例,尚缺乏系统性研究。

2 细沟侵蚀影响因素研究

影响细沟侵蚀的最直接因素是降雨径流侵蚀力和土壤抗侵蚀力^[4],其他诸如地形、土壤表面特征、土地管理等因素则是通过削弱或者加强这两类因素而对细沟侵蚀产生影响。

2.1 降雨径流条件

降雨和径流是土壤侵蚀的动力来源,降雨对坡面的作用主要体现在雨滴的打击,径流则是直接冲刷坡面并搬运泥沙。多数研究采用不同的特征指标来表征二者在细沟侵蚀产沙中的作用,结果还标明降雨对坡面径流也存在着影响。

收稿日期:2010-01; 修订日期:2010-05.

基金项目:国家自然科学基金项目(40971165);国家自然科学基金重点项目(40635027);中国科学院水利部黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金课题项目(10501-265)。

作者简介:李君兰(1986-),女,四川广安,硕士研究生,主要从事坡面土壤侵蚀等研究。E-mail: junlanyes@126.com

通讯作者:蔡强国(1946-),研究员,从事土壤侵蚀、水土保持、流域侵蚀产沙模拟研究。E-mail: caiqg@igsnr.ac.cn

在细沟侵蚀过程中,径流直接作用于坡面而产生冲刷作用,从径流的角度来探讨对细沟侵蚀的影响较为简便直接。径流的流态、能量、流动速度、水流动力等指标被大量采用,从这个角度出发展开的研究工作也取得了不少成果^[4,12-14]。然而,这些研究所使用的水流参数变量大多是从河流输沙研究中借用过来,坡面细沟流与河流并不能完全等同,故使用这些指标开展细沟侵蚀的研究工作不能够保证结果的完全真实准确。

从降雨条件的角度开展研究表明,降雨雨强、降雨能量与细沟侵蚀量的关系较为明显。Römken等^[15]所做实验结果显示,相同土壤和相同的雨强大小序列,雨强由大到小的系列模拟降雨与雨强渐大的系列模拟降雨相比,所产生的土壤侵蚀量更多。王治国等^[16]认为影响细沟侵蚀的降雨因子有雨强和雨量,回归结果为: $E_r=9.88+11.4\ln i+0.9985(\ln i)^2$ 。郑粉莉等^[5]用降雨动能及径流位能作为细沟侵蚀的动力源: $G_R=-2.632+1/44\times 10^{-2}E_g+7.487\times 10^{-4}E_d$;式中: E_g 和 E_d 分别是径流位能和降雨动能(J/m^2); G_R 是细沟侵蚀量(kg/m^2)。

雨滴的打击对坡面流可能产生很大影响^[17]。首先,坡面水蚀的主要侵蚀动力来自降雨及其产生的地表径流,径流量的大小与降雨强度及降雨量紧密相关。其次,侵蚀初期,降雨雨滴由高处下落时,会对径流有动量输入的作用^[18]。再次,雨滴的打击扰动了坡面径流,对其流态产生影响^[19]。最后,雨滴的打击使径流阻力增大^[20],在一定程度上也影响了细沟侵蚀过程。目前,这方面的内容已有学者做了大量的研究,降雨对径流的作用体现在多方面,那么,各种作用效应的贡献率有多大,其综合作用究竟是增强还是降低径流的侵蚀和搬运能力,这个问题还没有得到清晰的结论。

2.2 土壤因素

土壤对降雨径流击打冲刷的抵抗作用主要分为抗蚀性和抗冲性两种性能。影响土壤的抗蚀性、抗冲性的土壤自身因素主要有土壤的物理性质和化学性质^[21]。研究开展了大量的试验和调查工作,获得了对细沟侵蚀有影响的土壤条件指标,并进行了相应的量化研究。

水稳性团聚体^[4,22]、土壤容重^[15]、颗粒组成^[23]、土壤含水量等土壤的物理性质对细沟侵蚀的产生发展具有重要影响。土壤的物理性质极大地影响土壤的透水性能和土壤强度。有机质含量^[20]、氧化

钙、氮、磷、钾^[19]等土壤化学性质与土壤结构和紧密程度密切相关,土壤养分含量越高,土壤的结构和相互结合程度就越好,从而直接影响土壤的抗蚀、抗冲性能。此外,还有研究者尝试用崩解系数、渗透系数、分散率^[24]与土壤临界抗剪强度^[25]等综合性指标来表征土壤因子,探求土壤对细沟的影响作用。土壤因素对细沟侵蚀的影响取得了不少成果,为定量研究土壤因素的影响效果奠定了基础。然而,在实际的生产实践活动中,如何从众多的指标中选择一个能够代表当地土壤可蚀性的指标还存在一定的困难。通过野外监测和室内模拟实验,进一步获得各区域具有代表性的土壤可蚀性指标,是进行坡耕地细沟侵蚀预报和防治的基础。

2.3 地形因素

地形是影响坡面细沟侵蚀的重要因素之一,坡面坡度的大小、坡长的长短、坡形的不同都对细沟侵蚀的发育发展产生影响。坡度是坡面土壤侵蚀过程中影响最大的因素^[26],它是在细沟侵蚀研究中不可忽视的重要因素。随坡度的增加土壤的稳渗率降低,入渗量减小,径流量增加,土壤稳定性降低;而根据Govers^[27]、Nearing等^[28]的研究结果显示坡度对细沟流的流速没有明显的影响。总的来说,坡度的增加使得细沟侵蚀加剧、细沟产沙量增加,细沟均深增加^[29]。统计数据显示,坡度对细沟侵蚀量的影响常以幂函数形式出现时的拟合效果最好,普遍认为指数大于1,甚至达到2以上^[4,30-31]。

坡长对细沟侵蚀的影响程度不及坡度,且细沟侵蚀中坡长的影响不是单一的线性关系,更多地呈现出一种波动性的变化^[24,32]。统计结果显示,坡长的影响远不及坡度;以幂函数来统计坡长对细沟侵蚀的影响时,坡长的指数通常小于1^[4,26]。由于坡长对细沟侵蚀的相对影响较小且作用机理复杂,在研究工作中常被忽略。但是,坡长与细沟长度之间存在着不可分离的关系,沟长是细沟侵蚀量的一个重要贡献因素,也应当作为一个重要地形因素考虑。

在坡形因子影响研究方面,研究者主要将坡形分为凹、凸及直形坡分别考虑^[4,25]。坡形对细沟侵蚀的影响主要在于决定细沟的几何形态、发育密度及空间分布。凹型坡比凸型坡上的细沟侵蚀强,直形坡介于两者之间。坡形对水力侵蚀的影响,实际上是坡度、坡长两个因素的综合作用的结果^[33],研究者甚少将其考虑至细沟侵蚀量的计算元素中。

目前地形条件对细沟侵蚀影响的研究取得了

较大进展,但由于细沟侵蚀过程本身的复杂性和随机性,至今还没有深入和完善的研究。坡度对细沟侵蚀的影响较为明朗,总的来说是使得产流产沙提前,且增加了细沟的产沙量,但是也有研究表明坡度对流速的影响并不明显;若要从侵蚀机理上来讨论坡度对细沟的影响,这还需要更多的尝试和探讨。坡长和坡形对细沟的影响较复杂,因此,还没有广泛开展相关研究;获取更多的实验和野外调查数据并进行统计分析,将有助于深入了解二者在细沟侵蚀过程中的作用。

2.4 土壤表面特征

土壤表面特征对细沟侵蚀的影响是在刨去土壤内部结构、理化性质等因素的情况下,单纯考虑坡面上土壤表面的形态结构等特征。土壤表面的粗糙情况不一、结皮就会对降雨径流作用形成促进或阻碍的效果,从而对细沟侵蚀产生相应影响。

地表糙度反映为地表地貌形态,即微地形起伏或结构^[34]。部分学者认为,地表糙度可以增加由于雨滴击溅作用而导致的土粒分散阻力,增大地表蓄水能力并且减小流速,这样可削减径流侵蚀力^[35];而另有部分学者认为,粗糙地表的流量集中,具有潜在的冲刷作用,导致细沟增加,切沟发育^[15,36]。同时,在地表糙度对坡面细沟侵蚀产生影响的过程中,侵蚀过程又会进一步造成地表糙度演化^[37-39]。表土结皮对细沟侵蚀的影响存在促进与削弱两种观点。有研究表明,表土结皮的形成减少入渗^[40-41],减少地表糙度^[42],增加地表径流,同时可以显著增加表土的抗溅蚀能力,降低溅蚀率^[43],其中稳定入渗率和溅蚀率在结皮形成后可剧烈减少,将有助于降雨径流侵蚀力增大,从而极大地增加了诱发细沟侵蚀的可能性,最后可能使侵蚀量剧增^[44]。但是也有研究认为,表土结皮的形成增强了土壤的切变强度,阻碍细沟侵蚀的发生^[24]。造成两种差异观点存在的原因有:一是因为研究者所采用的土壤条件、研究地的地理条件和实验条件差异造成。其次,表土结皮的形成过程和细沟侵蚀的发生发展过程都存在动态性、复杂性、随机性。最后,表土结皮在坡面侵蚀发生的不同阶段表现出不同的作用:在结皮形成之初,其使土壤抗蚀力增强,对坡面侵蚀有削弱作用;然而,随着结皮使入渗减少,径流增大,冲刷增强,从而又加剧了坡面的水蚀,促进了细沟侵蚀的发生。

土壤表面特征对细沟侵蚀的影响研究取得了

一定的进展,但是至今大多还是定性描述。土壤表面特征对细沟侵蚀的影响复杂且随机,一定程度上增加了研究难度。总体来看,地表糙度对土壤侵蚀过程的作用机理仍未达成共识;而地表糙度对细沟侵蚀乃至土壤侵蚀的影响贡献率到底有多大,是否是影响侵蚀的主要因子,这还需要深入研究;同时,细沟侵蚀过程又会影响到地表糙度,两者之间是否存在耦合关系,这种相互影响的过程还需要进一步研究。现阶段表土结皮对细沟侵蚀过程的影响大多还是停留在定性的研究层面上,定量研究尚未广泛展开;坡面降雨过程和径流冲刷过程中,表土结皮和细沟侵蚀之间的交互影响也还有待深入研究。

2.5 土地管理因素

土地管理因素是体现人类坡耕地耕作活动的一个指标,土地管理措施合理与否会对坡面细沟侵蚀产生限制或加剧作用。

地表植被对土壤侵蚀有一定的减缓作用^[45],坡耕地上不乏植被的覆盖,但是依然可能产生严重的细沟侵蚀。究其原因,人类不合理的耕作管理措施才是引起细沟侵蚀的重要原因^[5,15],对土壤侵蚀具有放大效应^[46]。耕作措施对细沟侵蚀的影响,主要是通过影响土壤容重来影响下渗、起流时间、径流量和土壤抗蚀性。在侵蚀预报模型的研究中土地利用作为重要因子进行考虑,常用的USLE和WEPP模型都包含了此项内容,但是前者是一个半经验型的公式,后者涉及物理机理但参数过多不实用^[47],如何选取合适的指标来表征土地管理因素的作用还需进一步的深入研究。

3 细沟发生临界条件研究

20世纪70年代后期以来,学者们逐渐开展了细沟侵蚀临界条件的研究。研究方法主要分为临界水流条件、临界土壤条件、临界地形条件,各临界条件并非定值,而是受多方面因素的综合影响。目前对细沟发生临界条件的研究成果大多是针对某一环境下的特例,尚缺乏系统研究。

3.1 临界水流条件

当坡面水流达到一定水流条件时,才能有细沟发育。描述临界水流条件的指标主要有弗洛德数、雷诺数、径流量、水流动力、径流能量等。

Savat等^[48]的试验表明,当坡面径流弗洛德数为2~3时,细沟发育的概率很大;张科利等^[49]认为弗

洛德数 $F_r > 1$ 是细沟发生的临界水动力条件。雷阿林等^[50]运用实验方法比较雷诺数 R_e 、弗洛德数 F_r 和过水断面能量 E , 发现 R_e 作为细沟侵蚀的判断指标更为合适, 并且利用实验数据确定细沟侵蚀的动力临界为: $R_e \geq 1.486$, $F_r \geq 6.519$, $E \geq 1.387 \text{ cm}$ 。Meyer等^[51]认为存在着发生细沟侵蚀的临界流量。张科利等^[49]的试验表明细沟发生的临界径流量随坡度变化而有所不同。Rauws等^[52]基于实验数据, 认为 $3 \sim 3.5 \text{ cm/s}$ 的剪切流速是细沟发生的临界值。陆兆熊等^[53]在加拿大和黄土高原的室内外试验中测得坡面细沟发生的临界剪切流速为 $7 \sim 8 \text{ cm/s}$ 。蔡强国^[54]通过回归分析得到细沟发生的临界水动力 (E_{wr}) 与土壤抗剪强度 (K_r) 关系: $E_{wr} = 1.27 + 0.28K_r$ 。丁文峰等^[55]通过在黄土区的实验结果表明当径流能耗大于 7.38 J 时, 坡面有细沟侵蚀发生。

细沟发生临界水流条件的研究为细沟发生的判断提供了基础, 但是坡面土壤侵蚀发生的侵蚀动力还有降雨。降雨在坡面细沟侵蚀过程中的作用不可忽视, 是否存在坡面细沟侵蚀的临界降雨条件, 这个临界降雨条件和临界径流条件之间的关系如何转换, 又分别采用怎样的指标来表征两者的临界状态, 这些都需要进一步研究。

3.2 临界土壤条件

土壤的临界抗剪切力是表征土壤力学性质的一个重要指标, 也是定量分析坡面侵蚀发生的一个重要指标, 其大小直接反映土体抵抗外力作用而发生剪切力变形的能力, 并且与土壤凝聚力和内摩擦角有关^[56]。

土壤抗剪切力可以用剪切仪在野外直接测定或采集样本室内测定^[57], 或者通过实验计算得到。WEPP模型将坡面侵蚀分为细沟侵蚀与细沟间侵蚀, 其中, 细沟侵蚀模块的细沟侵蚀率是研究者广泛采用的基础理论公式, 由细沟侵蚀率、径流剪切力、土壤抗剪切力的关系式得到土壤的临界抗剪切力^[58]。唐泽军等^[59]进行了REE示踪土壤侵蚀过程和降雨模拟试验, 一系列的试验数据计算表明, 试验土壤临界剪应力值 $1 \sim 2 \text{ Pa}$, 平均值为 1.31 Pa 。由细沟侵蚀的影响因素分析, 可以得到土壤临界抗剪切力也受其他因素影响的结论, 然而目前还较少涉及这些内容。雷廷武等^[60]通过测定疏松土壤上细沟发生的条件, 计算得到了临界剪切力与坡度的

关系: $\tau_c = A + BS$, 式中: τ_c 为临界剪切力 (pa); S 为坡度 (%); A 和 B 为回归系数, 且通过回归实验数据表明, $A = 0$, $B > 0$, 即临界剪切力随着坡度的增加而增加。

3.3 临界地形条件

多数研究者通过资料数据分析研究认为存在着细沟侵蚀发生的临界坡度和临界坡长, 且两者都是其他自然因素综合作用的结果。

Savat等^[61]在总结大量有关细沟侵蚀研究的文献后, 提出欧洲壤土农地上细沟发生的临界坡度为 $2 \sim 3^\circ$, 砂壤土细沟发生的临界坡度为 $6 \sim 12^\circ$ 。蔡强国^[54]根据在王家沟地区进行的 58 个地块的细沟调查, 得到了临界坡度 A_r 与土壤抗剪力 K_r 的组合关系式: $A_r = -16.16 + 2.84K_r$ 。杨具瑞等^[62]根据细沟泥沙动力学, 建立泥沙起动公式, 分析计算得到细沟侵蚀发生临界坡度公式: $\partial \left(\frac{q^{0.25} J^{0.026}}{0.68V_c} \right) / \partial \beta = 0$, 式中: q 为单宽流量; J 为细沟比降; V_c 为粒径为 d 的坡面细沟泥沙起动流速; β 为坡面坡度。

由分水岭向下坡开始出现细沟的位置, 反映了坡地上片流转变为细沟流需要的坡长, 也就是发生细沟侵蚀的临界坡长。临界坡长的意义就在于为径流提供足够长的流动距离和汇水面积而使径流获得足够的动力和能量来进行侵蚀。罗来兴^[63]、唐泽军^[59]、陈永宗^[64]的资料数据表明存在细沟发生的临界坡长。郑粉莉^[65]发现细沟侵蚀发生的临界坡长与坡度呈非线性关系: $L_R = aJ^2 + bJ + c$, 式中: L_R 为临界坡长 (m); J 为坡度 ($^\circ$); a 、 b 、 c 为常数。

4 展望

细沟侵蚀是坡面耕地上普遍存在的现象, 已引起众多学者的关注。各个因素对细沟侵蚀的影响效应复杂多变, 细沟发生的临界条件的研究也需要综合考虑。这两方面的研究已经获得了大量成果, 但是还存在有待完善的研究领域, 仍需进一步加强和补充。

4.1 细沟侵蚀影响因素研究

细沟侵蚀过程是一个多因素共同影响的过程, 了解各因素对细沟侵蚀的影响效应和影响机理是对细沟侵蚀进行预报和防治的基础。虽然目前就细沟侵蚀影响因素的研究已有很多, 其中也不乏一定的定量研究。但这部分的研究工作并不全面, 降雨径流侵蚀力各自的贡献尚未完全清楚, 土壤和土

地管理因素主要指标的选择还没有统一的观点,土壤表面特征的研究尚处于定性阶段;再者,因素与因素之间是否存在交互作用,如果存在又如何将其体现在对细沟的产流产沙的分析和预测中,这也是一个值得考虑的问题。以后的研究,应该加强野外监测、室内试验等,进一步研究各种不同条件下坡面细沟侵蚀的效果,定量地给出各因素对细沟侵蚀影响的效应。

4.2 细沟发生临界条件研究

研究者都在寻找获取细沟发生的临界条件,结论因地而异。可以确定的是,临界条件不是一个定值,且不是一个独立的指标,它会受到其他因素的影响。目前,对于细沟临界条件的研究大多是针对点的研究,没有形成系统性的规模研究,应该开展广泛深入的研究。利用野外观测、室内模拟实验等方法,跟踪研究不同条件下坡面细沟的发育过程,综合研究临界条件受其他因素的影响规律,探索能否获得临界条件在不同自然环境下的系统变化规律,从而通过分析得到一个适用性较强的细沟发生的判断依据。

4.3 坡面细沟侵蚀的空间形态模拟

细沟侵蚀是坡面土壤侵蚀形式从面蚀逐渐向沟蚀发展的过渡阶段,因此细沟发育的过程也即是坡面形态发生显著变化的过程。不同的自然地理条件下,细沟发生的临界条件也不同,坡面空间形态发生变化的过程也不同,目前结合坡面空间形态变化来对细沟侵蚀进行的研究还较少。应用最新的数字技术模拟细沟侵蚀过程各阶段的坡面形态,将坡面细沟发育的形态变化规律与相应的实时观测记录数据相结合,从形态和数量上研究在不同的影响因素组合下细沟发生的临界条件、侵蚀量及坡面形态变化规律,这将是今后细沟侵蚀研究趋势。

参考文献

- [1] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] FAO. Soil erosion by water: some measures for its control on cultivated lands. Rome: [s.n.], 1965: 141-156
- [3] Meyer L D, Foster G R, Nikolov S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. Transactions of the ASAE. 1975, 18(5): 905-911.
- [4] 朱显谟. 黄土高原流水侵蚀的主要类型及有关因素. 水土保持通报, 1982(1): 1-9.
- [5] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素研究. 土壤学报, 1989, 26(2): 109-116.
- [6] 黄秉维. 谈黄河中游土壤保持问题. 中国水土保持, 1983(1): 8-13.
- [7] 雷廷武, 张晴雯. 细沟侵蚀物理模型. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] Foster G R, Meyer L D. A closed form erosion equation for upland areas//Shen H W. Sedimentation. Ft Collins. 210, 1972.
- [9] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow. Transaction of the ASAE, 1972, 15(1): 99-102.
- [10] 刘宝元, 史培军. WEPP水蚀预报流域模型. 水土保持通报, 1998, 18(5): 6-12.
- [11] 张玉斌, 郑粉莉. WEPP模型概述. 水土保持研究, 2004, 11(4): 146-149.
- [12] Foster G R. Modeling the soil erosion process//Hann C T, Johnson H P, Brakensiek H P. Hydrologic modeling of Small Watersheds, ASAE, St. Joseph, MI (Chapter 8), 1982: 297-382.
- [13] 丁文峰, 李占斌, 丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72-75.
- [14] 陈力, 刘青泉, 李家春. 坡面细沟侵蚀的冲刷试验研究. 水动力学研究与进展, 2005, 20(6): 761-766.
- [15] Römken M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. Catena, 2002, 46(2): 103-123.
- [16] 王治国, 魏忠义, 段喜明, 等. 黄土残塬区人工降雨条件下坡耕地水蚀的研究(I): 影响细沟侵蚀因素的综合分析. 水土保持学报, 1995, 9(2): 51-57.
- [17] Yen B C, Wenzel H G. Dynamic equations for steady spatially varied flow. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 1970, 96(3): 801-814.
- [18] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(I): 坡面流. 力学进展, 2004, 34(3): 360-370.
- [19] Emmett W W. Overland flow//Kirkby M J. Hillslope Hydrology. New York: John-Wiley and Sons, 1978: 145-176.
- [20] Yoon Y N, Brater E F. Spatially varied flow from controlled rainfall. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1962, 97(9): 1367-1386.
- [21] 吴淑安, 蔡强国, 朱同新, 等. 王家沟流域不同土壤的抗蚀性研究//晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究. 北京: 科学出版社, 1992.
- [22] 韩鲁艳, 贾燕锋, 王宁, 等. 黄土丘陵沟壑区植被恢复过程中的土壤抗蚀与细沟侵蚀演变. 土壤, 2009, 41(3): 483-489.
- [23] 肖培青, 郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀泥沙颗粒组成的影响. 泥沙研究, 2003(5): 64-68.
- [24] 蔡强国, 朱远大, 王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素. 水科学进展, 2004, 15(1): 12-18.

- [25] Ghebreyessus Y T, Gantzer C J, Alberts E E, et al. Soil erosion by concentrated flow: Shear stress and bulk density. *Trans. of ASAE*, 1984, 37(6): 1791-1797.
- [26] 靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用. *地理研究*, 1996, 15(3): 57-63.
- [27] Govers G. Time dependency of runoff velocity and erosion: The effect of the initial soil moisture profile. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1991, 16(8): 713-729.
- [28] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water resources research*, 33(4): 865-876.
- [29] 王贵平, 白迎平, 贾志军, 等. 细沟发育及侵蚀特征初步研究. *中国水土保持*, 1988(5): 13-16.
- [30] Gerard G. Rill erosion on arable land in Central Belgium: Rates, controls and predictability. *Catena*, 1991, 18(2): 133-155.
- [31] 雷廷武, Nearing M A. 侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究. *水力学报*, 2000(11): 49-54.
- [32] Gabriels D. The effect of slope length on the amount and size distribution of eroded silt loam soils: Short slope laboratory experiments on interrill erosion. *Geomorphology*, 1999, 28(1-2): 169-172.
- [33] 王礼先, 朱金兆. *水土保持学*. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [34] 吕悦来, 李广毅. 地表粗糙度与土壤风蚀. *土壤学进展*, 1992(6): 38-42.
- [35] Römkens M J M, Wang J Y. Soil changes from rainfall. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 1987, 30: 101-107.
- [36] Henlming K, Römkens M J M, Prosd S N. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: A flume study. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(1): 243-250.
- [37] Magunda M K, Larson W E, Linden D R, et al. Changes in microrelief and their effects on infiltration and erosion during simulated rainfall. *Soil Technology*, 1997, 10(1): 57-67.
- [38] Huang C, Gascuel-Oudou C, Cros-Cayot S. Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. *Catena*, 2001, 46(2/3): 177-188.
- [39] Römkens M J M, Prasad S N, Gerits J J P. Soil erosion modes of sealing soils: A phenomenological study. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 31-41.
- [40] McIntyre D S. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Science*, 1958, 85(5): 261-266.
- [41] Tackett J L, Pearson R W. Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. *Soil Science*, 1965, 99(6): 407-413.
- [42] 吴发启, 范文波. 坡耕地黄壤土结皮的理化性质分析. *水土保持通报*, 2001, 21(4): 22-24.
- [43] 陆兆熊, 蔡强国, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区表土结皮与坡度对径流产沙的影响//晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究. 北京: 科学出版社, 1992.
- [44] Singer M J, Le Bissonnais Y. Importance of surface sealing in the erosion of some soils from a Mediterranean climate. *Geomorphology*, 1998, 24(1): 79-85.
- [45] Woo M k, Fang G. The role of vegetation in the retardation of rill erosion. *Catena*, 1997, 29(2): 145-159.
- [46] 柳长顺, 齐实. 土地利用变化与土壤侵蚀关系的研究进展. *水土保持学报*, 2001, 15(5): 10-14.
- [47] 吴秀芹, 蔡运龙. 土地利用/土地覆盖变化与土壤侵蚀关系研究进展. *地理科学进展*, 2003, 22(6): 576-584.
- [48] Savat J, De Ploey J. Sheetwash and rill development by surface flow//Bryan R B, Yair A. *Badland Geomorphology and Piping*. Norwich: Geo Books, 1982: 113-126.
- [49] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 41-46.
- [50] 雷阿林, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀的动力条件. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(3): 39-43.
- [51] Meyer L D, Foster G R, Römkens M J M. Source of soil eroded by water from upland slopes//Present and Prospective Technology for Prediction Sediment Yield and Sources. Oxford: Sediment Yield Workshop, USDA Sedimentation Lab, 1975: 177-189.
- [52] Rauws G, Govers G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soil. *Journal of Soil Science*, 1988, 39(1): 111-124.
- [53] 陆兆熊, Merz W. 应用盐液示踪技术测定表面水流流速//王福堂. 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究. 北京: 科学出版社, 1992.
- [54] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究. *泥沙研究*, 1998(1): 52-59.
- [55] 丁文峰, 李占斌, 鲁克新. 黄土坡面细沟侵蚀发生的临界条件. *山地学报*, 2001, 19(6): 551-555.
- [56] 范兴科, 蒋定生, 赵合理. 黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(4): 69-75.
- [57] Crouch R J, Novruzi T. Threshold conditions for rill initiation on a vertisol. Gunnedah, N.S.W., Australia. *Catena*, 1989, 16(1): 101-110.
- [58] Gilley J E, Elliot W J, Lafren J M, et al. Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling. *Journal of Hydrology*, 1993, 142(1-4): 251-271.
- [59] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 确定侵蚀细沟土壤临界抗剪应力的REE示踪方法. *土壤学报*, 2004, 41(1): 28-34.
- [60] 雷廷武, Nearing M A. 水流作用下疏松土壤材料中细沟的再生及其临界剪切应力的实验研究. *农业工程学报*, 2000, 16(1): 26-30.
- [61] Savat J, De Ploey J. Sheetwash and rill development by surface flow//Bryan R B, Yair A. *Badland Geomorphology*

- gy and Piping. Geobooks, Norwich, 1982:113-126.
- [62] 杨具瑞, 史正涛, 曹叔尤, 等. 细沟侵蚀临界坡度研究. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 64-67.
- [63] 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. 地理学报, 1956, 22(3): 201-221.
- [64] 陈永宗. 陕北绥德地区沟间地水流侵蚀形态形成和分布规律的初步研究//黄河流域水土保持科学研究工作会议论文汇编. 郑州: 水利电力出版社, 1964.
- [65] 郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度. 中国水土保持, 1989(8): 23-24.

Reviewing on Factors and Critical Conditions of Rill Erosion

LI Junlan^{1,2}, CAI Qiangguo^{1,3}, SUN Liying¹, CHEN Xiao'an^{1,4}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049;

3. China National Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Yangling, 712100;

4. College of Resources and Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan, 430070)

Abstract: Rill erosion plays an important role in soil erosion process in loess hillslopes. It is a quantum leap during the process of soil erosion on slopes, and also is the beginning of a qualitative change in the process of soil erosion. On the basis of studying many papers, the authors review the study of factors and critical conditions of rill erosion. Rainfall and runoff, soil, topography, soil surface characteristics and land management all have their impact on rill erosion. On the one hand, researches use a variety of parameters to represent the impact of rainfall and runoff, soil, topography and land management. On the other hand, there are two forms of soil surface characteristics, namely, surface roughness and surface soil crust. The studies on the impacts of both of them are still in a qualitative research stage, and some studies have shown they can weaken rill erosion, the other studies concluded that they would exacerbate the occurrence of rill erosion.

The generation of rill on the slopes needs certain conditions, and the critical runoff, soil and terrain conditions have their corresponding research results. The critical conditions for the generation of rill are not numbers, but are related to many factors. Critical conditions for rill erosion are not fixed values, but all of them should be a comprehensive index of other factors.

At the same time, the future possible research direction and contents of the influencing factors and the critical conditions of rill erosion are pointed out. More experiments and field observation data are needed. In rill erosion factors research, the following points need further works: (1) the quantitative analysis of the impact of rainfall and runoff on the joint action of rill erosion; (2) screening key indicators to represent the effect of soil, topography and land management factors; (3) an in-depth study on how the soil surface characteristics affect rill erosion, and a quantitative analysis of the impact of surface roughness and soil crust on rill erosion; (4) the interaction of various factors with the impact of rill erosion. Meanwhile, the studies of critical conditions of rill erosion need more investments, which include: (1) exploring the critical rainfall conditions for rill erosion, and finding out its relationship with critical runoff conditions, (2) a systematic study on the critical conditions in different areas, to obtain a judgment with strong applicability about whether rill erosion will occur.

Key words: rill erosion; factors; critical conditions; soil characteristics

本文引用格式:

李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1319-1325.