

# 坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望\*

雷 阿 林

(水利部国家环保局长江流域水资源保护局·武汉市·410051)

唐 克 丽

中国科学院  
(水利部水土保持研究所)

**摘 要** 该文概述了黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究的主要成果;追踪国际土壤侵蚀研究动态;提出了深化该问题研究的设想,即以力学分析为主线,以实验模拟为手段,以侵蚀形态、物质、能量的时空联系为特色,揭示了坡沟系统土壤侵蚀的物理力学成因,为水土保持实践提供科学依据。

**关键词:** 坡沟系统 土壤侵蚀 力学分析 实验模拟

## Retrospect and Prospect for Soil Erosion Studies of Ridge- Hill- Gully Slope System

*Lei Alin*

*(Changjiang River Basin Bureau of Water Resource Conservation, Ministry of Water Resources and State Bureau of Environmental Protection, 410051, Wuhan, PRC)*

*Tang Keli*

*(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources)*

**Abstract** The main achievements on soil erosion studies of ridge- hill- gully slope system in loess plateau are outlined. Based on the trends of studies in this field mentioned above, it is suggested that dynamic analysis should be taken as the key link, experimental simulation as the basic method, time- space relationship between erosional forms, material and energy as the characteristics, thus bringing to light physical genesis of soil erosion in ridge- hill- gully slope system and providing scientific basis for soil and water conservation practice.

**Keywords:** ridge- hill- gully slope system; soil erosion; dynamic analysis; experimental simulation

黄土高原大的地貌单元可划分为沟间地和沟谷地两种形态。一般以沟(谷)缘线(多为梁峁边线)为界,其上为由各种梁峁顶面和斜坡,以及塬面、台塬面等所构成的沟间地;其下为由各坡及切沟、冲沟、干沟、河沟等沟道所构成的河谷地。在黄土高原的任一沟道小流域、或小流域内的任一从分水岭至沟谷底部的纵向斜坡剖面上,沟间地与沟谷地常沿垂向展布,相应地各种

侵蚀微地貌也呈现有序的垂向排列格局,该区域所发生的各种土壤侵蚀现象都有相似的规律可循。我们将这种由沟间地与沟谷地及各种环境要素所构成的,具有独特结构与功能的区域空间综合体,称之为坡沟系统。

黄土高原坡沟系统既是区域侵蚀产沙的主要源地,又是控制水土流失,恢复与重建生态环境的基本治理单元。对其侵蚀现象与规律的探究,历来为黄土高原环境整治中理论性与实践性均很强的重要科学命题。多年的工作积累,人们在该问题的研究上已取得许多有价值的成果。但由于问题的复杂性,迄今为止,对坡沟系统土壤侵蚀现象的解释,还没有一个较为完满的答案,尤其在泥沙来源、坡沟关系及治理策略等一些基本问题上还存在较大分歧与争议。本文将通过对前人研究成果的回顾与归纳,揭示以往研究中的存在问题,追踪国际研究动态,提出深化黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究的若干设想。

## 1 坡沟系统土壤侵蚀研究的主要成果与问题

### 1.1 侵蚀方式与形态的垂直分带

黄秉维<sup>[1]</sup>(1953, 1955), 席承藩<sup>[2]</sup>(1953), 朱显谟<sup>[4,5]</sup>(1956, 1981, 1982), 罗来兴<sup>[6-8]</sup>(1956, 1958, 1965), 朱震达<sup>[9]</sup>(1958), 陈永宗<sup>[10]</sup>(1984)等在不同时期,曾就黄土高原土壤侵蚀类型和侵蚀分区等问题进行过深入细致地研究。承继成<sup>[11]</sup>(1965), 陈永宗<sup>[12-14]</sup>(1963, 1976, 1988), 甘枝茂<sup>[15]</sup>(1980)等,曾就黄土区土壤侵蚀方式和侵蚀形态的垂直分带性规律进行过不同程度地分析和讨论。唐克丽等<sup>[16]</sup>(1991)总结归纳前人研究成果,并结合“七五”工作实践,深入系统地论述了黄土高原地区土壤侵蚀的区域特征。这些研究结果,大大深化了人们对于黄土高原侵蚀环境及其土壤侵蚀区域分异规律的认识,尤其是清楚地为我们展示了坡沟系统土壤侵蚀方式和侵蚀形态空间垂直分异的基本格局,为从定量和动力学角度研究坡沟关系和坡沟系统土壤侵蚀规律奠定了重要基础。

### 1.2 侵蚀物质(泥沙)的来源分布

40年代初,我国在甘肃天水建立水土保持试验站,开始坡沟系统土壤侵蚀的野外定位观测。但设备简陋,观测项目少,真正大规模地系统观测研究是在建国后才发展起来的。1951和1953年黄委会分别在陇东西峰和陕北绥德建立水土保持试验站,并于1952年扩建了天水站,1955年山西省在离石建立水保试验站,其它省区也相继设站。自此以后的多年间,这些站及后续建立的其它一些站,为研究揭示坡沟系统的土壤侵蚀规律积累了丰富的观测资料。

自60年代以来,相继有许多学者对各试验站的小区观测资料进行了统计分析,定量表达黄土高原不同区域土壤侵蚀物质的垂直分布特点及相互关系。我们将其中最主要的一些研究者,包括蒋德麒<sup>[19]</sup>(1966), 龚时<sup>[18]</sup>(1978)、西峰试验站<sup>[19]</sup>(1979)、曾伯庆<sup>[20]</sup>(1980)、常茂德<sup>[21]</sup>(1986)、徐雪良<sup>[22]</sup>(1987)等的研究方法与分析结果综合归纳并列于附表。

由表1可见,资料统计方法不同,研究结果也不同。焦菊英等<sup>[23]</sup>(1992)对不同估算方法的优劣进行了评价,并提出用系统法计算黄土丘陵区小流域沟间地与沟谷地的侵蚀产沙量。尽管各种方法均有缺陷,但从前人的研究中,人们仍然获得了一些有益的结论。首先从侵蚀模数的比较可以看出,沟谷地的侵蚀强度一般大于沟间地。其次,就黄土台状地沟壑区而言,泥沙绝大多数来自沟谷。就典型黄土丘陵沟壑区而言,如果沟谷地和沟间地面积相近,则泥沙主要来自沟谷地;如果沟间地面积比沟谷地大得多(如团山沟的情况),则泥沙大部分来自沟间地。

齐矗华等<sup>[24]</sup>(1991)根据调查资料推测,黄土长坡丘陵(山地)沟壑区,沟间地侵蚀总量可能大

于沟谷地侵蚀总量。再次,如果不受上坡或塬面来水来沙的影响,沟谷的侵蚀强度将大大降低。陈浩<sup>25</sup>(1992)结合离石羊道沟观测资料和室内模拟实验结果,也强调了上部来水来沙的影响,对整个坡沟系统产流产沙过程的强化作用。

附表 黄土高原不同区域坡沟系统侵蚀产沙垂直分布统计表

代表区域类型	研究流域	资料统计方法	统计分析结果							
			沟间地			沟谷地			沟谷地与沟间地侵蚀模数比	无上坡来水来沙时,沟谷侵蚀减少量(%)
			侵蚀模数 t/(km <sup>2</sup> ·a)	面积 (%)	侵蚀量 (%)	侵蚀模数 t/(km <sup>2</sup> ·a)	面积 (%)	侵蚀量 (%)		
黄土台状地沟壑区	西峰小河沟	平衡法	791.85	75.3	13.7	15 198.4	24.7	86.3	19.2	55.8~58.8
典型黄土梁峁丘陵沟壑区	离石羊道沟	分带法	6 740	49.7	20.0	27 300	50.3	80.0	4.05	74.0
	离石王家沟	平衡法	10 900	59.5	47.1	14 200	40.5	52.9	1.30	-
	绥德团园沟	平衡法	26 300	45.4	43.3	28 500	54.6	56.7	1.10	-
	绥德韭园沟	平衡法	16 000	56.6	50.1	20 700	43.4	49.9	1.30	-
	子洲团山沟	修正法	10 616	56.6	30.8	27 915	43.4	69.2	2.63	-
		平衡法	19 600	74.0	61.8	34 500	26.0	38.2	1.72	-
		修正法	20 282	74.0	62.7	34 375	26.0	37.3	1.69	72.4

前述一些研究者还注意到,破坏植被,不合理开垦等人为活动对坡沟系统土壤侵蚀过程的加剧作用。唐克丽等<sup>[6,27]</sup>(1983,1984)通过对杏子河流域的考察也指出,沟谷陡坡的毁林开荒是该流域土壤侵蚀加剧的重要原因。唐克丽等<sup>[8]</sup>(1993)还在子午岭林区长期设站观测,研究植被恢复前后的土壤侵蚀特点,指出唯有当沟谷植被破坏殆尽时,其侵蚀强度才将超过坡面的侵蚀强度,可见植被抑制侵蚀作用之显著。

### 1.3 坡沟关系的定性认识与研究薄弱点

黄土高原水土流失面积之广大,土壤侵蚀问题之严重,以及治理要求上的生态、经济、社会三大效益并重,使该区域环境整治问题显得异常艰巨与复杂。因此,兼顾三大效益,并区别轻重缓急、主次先后,就成为黄土高原治理决策的一个基本点。它不仅要求确定地域上的轻重缓急,而且需要决定具体治理地区坡沟的主次侧重。由后一方面主次先后的考虑就引发了关于黄土高原坡沟关系问题的讨论。

坡沟关系是黄土高原的特有问题。它紧密联系着三方面的内容,即坡沟系统土壤侵蚀规律,水土流失治理方针,以及治理措施的配置。其核心是侵蚀规律,它是合理方针拟定与措施优化配置的理论依据。坡沟关系的争议常由治理方针的选择而引起,但其实质却反映了侵蚀规律研究的薄弱。早在50年代就曾出现治坡为主,还是治沟为主的辩论,几十年来围绕这一问题一直争论不休,至今没有一个足以令人信服的圆满答案。一个时期,当强调治坡的观点占优势时,治理上坡面的梯田与林草措施便得到加强。另一时期,当强调治沟的观点占优势时,治理上沟谷的坝库工程便受到重视。两方面均有成功的范例,更有失败的教训。而在黄土高原的治理实践中,较长时期主要是治沟的观点居统治地位。这是因为在短期内坝库工程的拦沙效益非常显著,而且增产效益也相当明显。治理上的这种重视一面,忽视另一面的做法,显然是不全面的。周佩华等<sup>[9]</sup>(1994)认为,把坝系农业作为治黄之本更是不适当的。

随着坡沟系统土壤侵蚀研究的逐渐深入和小流域水土流失治理经验的积累,人们对坡沟关系的认识也在不断深化。但由于目前的坡沟系统土壤侵蚀研究还存在一定的问题,从而使其

规律没有得到充分揭示,进而影响到治理方针及措施配置的最终决策。这些问题可归纳为下述几点:

(1) 静态特点:以往研究侧重于揭示土壤侵蚀物质与侵蚀形态的空间联系与空间分异特点,而突出时间因素的土壤侵蚀动态过程的研究内容还相对较少。

(2) 经验性:定量研究主要采用了统计分析这一经验性方法,因此所得结论只适用于研究条件和研究流域,不能应用外推或在较大区域上比较。还没有使研究工作深入到动力学机制分析的理论研究阶段。

(3) 非标准化:野外定位观测实验,从小区的选择、设计与建造,观测内容和方法,直至资料的整编与分析都还不够高度规范和标准化,因而出现资料的混乱和精度较差问题,影响到结论的可靠性。室内模拟实验,由于没有成熟的土壤侵蚀实验理论的支撑,特别是一些最基本的实验理论问题,如原型的相似分析,原型的分类及原型选定,各种土壤侵蚀过程相似与模化原理,尺度效应,边壁影响,随机过程等没有得到根本解决,使模拟实验结果很难与野外观测资料联系起来,也就使室内模拟实验难以发挥其应有的作用。

(4) 代表性差:这是经验性方法所必然带来的负面影响。为了弥补其缺陷,就需要有较多的代表不同区域特点的观测统计资料,遗憾的是黄土高原上这样的小区观测还相对较少。现有研究结论因来自较少的点位资料,代表性较差,自然不能令人信服。

以往研究的缺陷,要求我们重新审视坡沟关系与坡沟系统土壤侵蚀问题,从研究思路的确定到研究方法的选择上,寻求创新与突破,这是我们揭开该问题奥秘的一条必由之路。

## 2 国际土壤侵蚀研究动态

以德国土壤学家 Wallny(1977年至1895年)完成的第一批土壤侵蚀小区观测试验为标志,作为科学的国际土壤侵蚀研究迄今已有一百多年的发展历史。其间经历了20年代以前的,以定性描述为主要特征的,土壤侵蚀宏观规律的观察与认识时期。20年代至60年代的,以定位观测和定量表达为标志的,通用土壤流失方程式及各种经验关系方程的建立及应用发展时期;及60年代以后,特别是80年代以来的,以过程为目标的,理论分析,实验模拟及数学模拟相结合的土壤侵蚀动力学机制的研究时期等三个主要发展阶段。作为当代国际土壤侵蚀研究热点的动力学过程研究,其主要进展有下列几个方面。

### 2.1 各种水沙流运行的动力学机理

降雨产流后,径流顺坡向下运动,分别形成坡面流,细沟、浅沟流及沟道流等多种水流类型,在其作用下相应形成了片蚀、坡面沟蚀及沟道侵蚀等土壤侵蚀方式和类型。研究这种由降雨产生的,并不时受降雨扰动的不同水流类型的流水的水力学特性,产沙输沙的力学特征,必将促使人们从动力学角度认识土壤侵蚀动态变化和垂直分异的本质原因。

流水的水力学特征一般包括流态、流速分布、阻力规律及运动方程。由于坡面各种水流的流层薄,流态复杂,因此还应研究降水、地表糙度及微地貌对水流的干扰作用。Horton<sup>[60,31]</sup>(1943,1945)最早从水文学角度对坡面流的特性进行了系统的定量研究。Emmett<sup>[62]</sup>(1970)则从实验的角度对坡面流的水力学特性进行了详细分析。同期,Yoon<sup>[63]</sup>(1971)、Shen<sup>[64]</sup>(1973)也据实验资料,分析过坡面流的阻力规律。Young<sup>[65]</sup>(1973)、Foster<sup>[66]</sup>(1984)及Sadeghian<sup>[67]</sup>(1990)曾通过不同条件下的实验研究和理论分析探讨过细沟流的流速及分布、水力半径及阻力系数的表达式。Gerard<sup>[68]</sup>(1992)根据野外调查和实验研究,建立了细沟流的流量、流速与过水断面面积间的关系。其它水流类型的水力学特征则很少研究。

各种水流类型的产沙与输沙的力学特征,一般包括泥沙的性质,分离作用及规律,泥沙运动形式,挟沙能力,输沙率、输移比等,还应研究降雨在产流产沙及输沙中的作用与特点。Hor-ton<sup>[60]</sup>最早把坡面流的侵蚀作用与水流的切应力联系起来。Meyer和Wischmeier<sup>[69]</sup>(1969)。Foster<sup>[60]</sup>(1977)。及Nearing<sup>[61]</sup>(1989)等从这一角度进行了深入研究。Guy<sup>[62]</sup>(1987)据实验资料,分析了降雨对坡面流输沙能力的影响。Julien<sup>[63,44]</sup>(1985,1989)运用量纲分析方法,建立了坡面流输沙能力的无量纲关系式。Lu和Cassol<sup>[65]</sup>(1989)通过实验分析了坡面流的泥沙运动方式。Foster<sup>[66]</sup>(1982),Meyer<sup>[67]</sup>(1985)曾分析过细沟流分离土壤的作用。Foster<sup>[68]</sup>(1982)还认为,许多明渠流的输沙关系式可用来描述细沟流的输沙能力。对于沟道流,人们已注意到它与一般明渠水流的差别,也认识到重力侵蚀在沟道侵蚀中的重要作用,但从动力学角度研究其产沙与输沙特征还相对较少。

## 2.2 土壤侵蚀与坡面发育

坡面的侵蚀分带人们已有较多的研究,但坡面上各种微地貌的发育,还缺乏具有物理意义的判定标志。Savat<sup>[69]</sup>(1982)等曾通过实验资料分析认为,当坡面径流的弗罗德数为2~3时,细沟发育的机率很大。这是目前仅见的坡面微地貌产生的力学判定标志。M. A. 卡森和M. J 柯克拜<sup>[60]</sup>(1984)依据侵蚀力学的观点,把一切坡面都看作是力和阻力的连续对抗系统,从分析力和阻力的矛盾着手,论述了力和阻力的相互作用所引起的坡面过程,根据物理学定律,对力和阻力之不同组合所产生的不同性质的过程,作了详尽研究,建立了各个过程的数学模型,然后,以这些模型为基础,建立起不同气候条件下的典型坡面的发育过程——反应模型。最后,应用这些模型,阐述了坡面形态特征与演化规律。但迄今还未见将侵蚀物质、侵蚀形态及侵蚀能量三者相联系的土壤侵蚀动力学机制的研究报道。

此外,关于土壤侵蚀动力学机制的研究,还有侵蚀力和抗蚀力,侵蚀与产沙的数学模拟及实验模拟的理论与方法等内容。

借鉴国际土壤侵蚀研究新的思路和方法,有助于我们加深对黄土高原坡沟系统土壤侵蚀问题的认识,为揭示该问题的物理本质,拟定合理的侵蚀环境整治方略和有效的坡沟治理措施寻求到新的突破口。

## 3 深化坡沟系统土壤侵蚀研究的构想

我们认为,黄土高原的坡面与沟谷首先是一个在空间结构和时间序列上,紧密联系不可分割的统一的动态开放系统。这里,降雨是其输入或激励变量;径流和泥沙是其输出响应或状态变量;各种自然条件和人为活动则构成其外部环境,并从一定程度上左右着系统输入与输出的时空变化。其次,坡沟系统内的侵蚀物质、侵蚀能量及侵蚀形态间存在着一种特殊的联系形式。即在各种侵蚀力和抗蚀力的相互作用下,以侵蚀物质的输移和产出为标志,以侵蚀能量的流动为纽带,以不断演化着的侵蚀形态彼此关联,有序排列的链状结构体为通道,构成一个有机的整体,我们称之为土壤侵蚀链。在上述认识的基础上,结合前人的研究成果,并借鉴国际土壤侵蚀研究的经验,我们的研究思路可简单概括为,以力学分析为主线,以实验模拟为手段,以形态—物质—能量相联系的动力学过程分析为特色,以揭示坡沟系统土壤侵蚀的物理成因,寻求科学的治理方略和最佳的措施配置方案为目标。其主要研究内容包括以下方面:

(1) 土壤侵蚀的动力环境。包括土壤侵蚀环境的侵蚀和抗蚀力类型、作用及表现特点;最重要的侵蚀力和抗蚀力的分析确定。

(2) 各种水沙流运行的动力学机理。水力学特性包括水深、流速、流量的表达,时空变化及

相互关系; 流型、流态变化及其判定; 阻力特征、表达式及阻力规律; 降雨、地表糙率及地形的影响。侵蚀力学的研究包括, 土壤分离、崩解、溶解的力学机制; 降雨侵蚀力和径流侵蚀力的时空变化; 各种侵蚀方式的力学判定标志及水力学分类。输沙力学包括; 泥沙的特征, 泥沙运动方式, 挟沙能力、输沙率, 输移比及半理论输沙模型等。

(3) 土壤侵蚀链的形成和演化规律。包括土壤侵蚀链的概念、类型及特点; 土壤侵蚀链的物质联系, 能量联系, 形态联系, 相互关系及规律; 侵蚀能量的传递特征及侵蚀机械能的削减途径。

(4) 土壤侵蚀的模拟相似与研究标准化。模拟相似原型分类及原型选定; 模型分割与模型综合技术; 比例尺选择与尺度效应; 土壤侵蚀的相似与模化原理。标准化问题包括, 降雨装置, 变坡水槽, 抗冲槽等实验装置的研制与规范化;  $^{137}\text{Cs}$  与 REE 示踪方法的引入及方法标准化; 各种高精度的流速、水深、流量、泥沙、微地貌等测定仪器的研制; 实验装置的边壁影响规律及校正方法; 随机现象及随机因素分析; 实验数据规范化处理及误差系统分析等。

#### 参 考 文 献

- 1 黄秉维. 陕西黄土区域土壤侵蚀的因素和方式. 科学通报, 1953(9)
- 2 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训. 科学通报, 1955(12)
- 3 席承藩等. 陕北绥德韭园沟土壤侵蚀情况及水土保持方法. 土壤学报, 1953, 2(2)
- 4 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类. 土壤学报, 1956, 4(2)
- 5 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, 1981(3~4); 1982(1, 3)
- 6 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷地的地貌类型. 地理学报, 1956, 22(3)
- 7 罗来兴等. 黄土高原典型沟道流域侵蚀地貌与水土保持关系论丛. 西安: 科学出版社, 1958
- 8 罗来兴, 朱震达. 编制黄土高原水土流失与水土保持图的说明与体会. 中国地理学会, 1963年年会论文集(地貌), 北京: 科学出版社, 1965
- 9 朱震达. 应用数量方法来研究黄土丘陵地区的侵蚀地貌. 地理学报, 1958, 21(1)
- 10 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型. 地理科学, 1984, 4(4)
- 11 承继成. 坡地流水作用的分带性. 中国地理学会, 1963年年会论文集(地貌), 北京: 科学出版社, 1965
- 12 陈永宗等. 陕北绥德地区沟道流域侵蚀分带及沟间地侵蚀形态分布规律. 中国地理学会, 1963年年会论文集(地貌), 北京: 科学出版社
- 13 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵地区坡地的侵蚀发育. 地理集刊(10). 北京: 科学出版社, 1976
- 14 陈永宗等. 黄土高原现代侵蚀与治理. 北京: 科学出版社, 1988
- 15 甘枝茂. 黄土地貌垂直变化与水土保持措施布设. 人民黄河, 1980, (3)
- 16 唐克丽等. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径. 北京: 中国科学技术出版社, 1991
- 17 蒋德麒等. 黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理. 中国科学, 1978, 11(6)
- 18 龚时, 蒋德麒. 黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理. 中国科学, 1987, 11(6)
- 19 黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站. 从南小河沟治理成果探讨黄土高原沟壑区的治理途径. 人民黄河, 1979(3)
- 20 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区水土流失规律及治理效益. 人民黄河, 1980(2)
- 21 常茂德. 陇东黄土高原沟道小流域的土壤侵蚀. 水土保持通报, 1986(3)
- 22 徐雪良. 非园沟流域沟间地、沟谷地来水来沙量的研究. 中国水土保持, 1987(8)
- 23 焦菊英, 刘元保. 小流域沟间与沟谷地径流泥沙来量的探讨. 水土保持学报, 1992, 6(2)
- 24 齐矗华等. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系研究. 西安: 陕西人民教育出版社, 1991,
- 25 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响. 水土保持学报, 1992, 6(2)
- 26 唐克丽等. 杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治. 水土保持通报, 1983(3)

- 27 唐克丽等. 杏子河流域的土壤侵蚀方式及其分布规律. 水土保持通报, 1984(5)
- 28 唐克丽等. 黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化. 北京: 中国科学技术出版社, 1993
- 29 周佩华, 吴普特. 治黄之本在于水土保持. 水土保持通报, 1994(1)
- 30 Horton R E et al. Laminar sheet flow. Transactions of the American Geophysical Union, 1943.
- 31 Horton R E. Erosional development of striams and their drainage basins: Hydrological approach quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America, 1945, 56: 275 ~ 370
- 32 Emmett W W. The hydraulics of overland flow on hillslope, U. S. Geolog. Surv. Prof. Paper 662A, 1970
- 33 Yoon N Y, Wenzel G H. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. J. Hyd. Div. ASCE. 97(HY 9)
- 34 Shen H W, Li R M. Rainfall effect on sheet flow over smooth surface. Proc. Am. Soc. Civil Engineerings, 99(HY 5)
- 35 Young R A, Wiersma J L. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. Water Resources Research, 1973, Vol. 9.
- 36 Foster G R et al. A laboratory study of rill hydraulics: 1. velocity relationships, Trans. ASAE, 1984, 27(3)
- 37 Sadeghian M R, Mitchell J K. Hydraulics of micro-braided channels: Resistance to flow on tilled soils, Trans. ASAE, 1990, 33(2)
- 38 Gerard Govers. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17: 515 ~ 528
- 39 Meyer L P, Wischmeier W H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water, Trans. ASAE. 1969, 12(6)
- 40 Foster G R et al. An erosion equation derived from basic erosion principles. Trans, ASAE, 1997, 20(4)
- 41 Nearing M A et al. A process-based soil erosion model for USDA- water erosion prediction project technology. Trans. ASAE. 1989, 32(5)
- 42 Julien P Y, Simons D B. Sediment transport capacity of overland flow, Trans. ASAE. 1985, 28(3)
- 43 Julien P Y. Soil erosion losses from upland areas, Proceedings of the fourth international symposium on river sedimentation, 1989
- 44 Lu J Y, Casol E A. Sediment transport relationships for shallow flow conditions. Proceedings of the fourth international symposium on river sedimentation, 1989
- 45 Foster G R. Modeling the soil erosion process, In Hydrologic Modeling of Small Watersheds. American Society of Agricultural Engineers. 1982, 297 ~ 382
- 46 Meyer L P, Harmon W C. Sediment losses from cropland folws of different gradients. Trans. ASAE, 1985, 28(2)
- 47 Foster G R. Relation of USLE factors to erosion on rangeland. In: Proc. workshop on estimating on soil erosion and sediment yield from rangelands 17- 35, ARM- W ~ 26 USDA Agriculture Research Service, 1982
- 48 Savat J, Ploey J De. Sheet wash and rill development surface flow. in R. B. Eryan and A. Y air(Eds) Bad-land Geomorphology and Piping. Geobooks Normich. 1982, 113 ~ 126
- 49 〔英〕卡森 M A, 柯克拜 M J, 龚葆璋译. 坡面形态与形成过程, 北京: 科学出版社, 1984