

文章编号: 1001-6791(2001)03-0395-08

坡面水蚀过程水动力学研究进展

张光辉

(北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875)

摘要: 径流分离土壤是侵蚀泥沙的主要来源, 也是建立土壤侵蚀物理模型的控制参数之一。对国内外坡面径流分离土壤过程的研究方法、流速测定、控制方程、分离能力、挟沙力及存在的问题进行了系统深入的论述, 旨在综合已有研究经验和成果, 促进相关研究的发展。

关键词: 坡面水蚀; 分离过程; 水动力学; 综述

中图分类号: S 157.1; TV 131.2 **文献标识码:** A

坡面水蚀包括降雨击溅和径流冲刷引起土壤颗粒分离、泥沙输移和沉积三大过程, 研究、分析这些过程发生、发展的水力、土壤、地形条件以及各过程间相互转化、相互影响的机理, 是建立土壤侵蚀物理模型的前提条件。在降雨击溅和径流冲刷作用下, 土壤颗粒脱离土体, 离开原始位置的过程为分离过程。泥沙输移是指分散的土壤颗粒被径流输送的过程, 特定水动力条件下, 泥沙输移受水流挟沙力的限制, 当水流输沙率小于挟沙力时, 水流输沙的同时仍存在分离过程, 水流输沙率增大。当输沙率达到水流挟沙力时, 分离过程停止, 如输沙率继续增大, 部分泥沙在重力作用下发生沉积, 返回土壤表面^[1,2]。这些过程受坡面径流水动力条件(诸如流量、坡度、流速、阻力、水深等)的影响和控制。坡面径流分离土壤、输送泥沙的机理与明渠水流差异很大^[3,4]。因此, 研究坡面径流分离土壤过程的水动力学机理, 是分析坡面水蚀过程、建立坡面水蚀模型的前提, 具有重要的理论和实践意义。

1 研究方法

常见的研究方法可分为室外和室内两大类。室外方法通常选择比较规则、具有代表性的坡面, 根据研究目的需要, 建立相应的观测小区, 基本要求是小区能够完整地反应地形地貌特征, 试验时多采用模拟降雨结合放水冲刷。放水流量根据试验目的确定, 试验时用径流桶或量水堰测定径流流量, 同时采集径流样, 用于径流分离土壤速率的分析。室内方法多在坡度可调的水槽中进行, 水槽的宽度多为 0.25 ~ 0.6 m, 长度则因试验目的不同有所差异。根据试验目的, 试验时可以采用放水或放水结合模拟降雨。根据水槽下垫面情况的不同, 室内方法可分为

收稿日期: 2000-05-18; 修订日期: 2000-07-03

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(49725103); 国家自然科学基金青年基金资助项目(40001014)

作者简介: 张光辉(1969-), 男, 甘肃静宁人, 北京师范大学资源与环境科学系博士后, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。

定床和动床两类,定床是指试验过程中水槽底部的糙率保持不变,常将试验土样粘于水槽底部,试验时水流无法改变水槽糙率,这样既可模拟天然地表糙率,又消除了下垫面糙率变化对水流阻力的影响。试验时同样进行流速测定、流量记录、泥沙样采集等。

自 1958 年朱显谟先生^[5]提出抗冲性以来,抗冲槽被广泛用于土壤抗冲性的研究^[6~8],该方法设备简单、容易操作、试验周期短,可迅速对不同下垫面的抗冲性做出定量评价。但由于抗冲槽仅能控制流量和坡度,无法获得流速或水深,从而无法对土壤冲刷过程进行深入的水动力学分析,同时抗冲槽法样品偏小,土样采集过程中难免会产生扰动,特别在根系分布较多的林地,取样难度很大,且代表性差。如何对抗冲槽法进行改进,使其更好地反映土壤冲刷过程,仍是一亟待研究的问题^[9]。

2 坡面水流流速

2.1 流速测定方法

在坡面侵蚀过程中,径流深度不超过几个厘米,属薄层水流范畴,因此径流深度的测定十分困难,在研究中常通过流速的测定,利用已知的水力断面特征、用流量结合曼宁公式或谢才公式计算出径流深度,因而平均流速的测定显得非常重要。常用的流速测定方法有染色法^[10]、盐溶液法^[11]和热膜速度测定仪法^[12]。

染色法和盐溶液法是用于坡面径流流速测定的常用方法,多数研究者认为用染色法和盐溶液法获得的流速是径流表面最大流速,要得到径流平均流速必须进行修正。Horton^[13]对光滑河床层流进行研究后发现,水流平均流速与表面水流速度之比为 0.67。Emmett^[14]通过一组复杂的实验室试验发现,层流的修正系数通常为 0.5~0.6,随着水流雷诺数的增大,修正系数随着增大,当水流过渡为紊流时修正系数达 0.8。但在野外条件下,修正系数略为偏小,为 0.4~0.5。与 Emmett 的试验结果类似,Luk 和 Merz^[11]的研究表明,层流的平均修正系数为 0.52,过渡流和紊流的平均修正系数为 0.75。但 King 和 Norton^[15,13]的研究表明,修正系数的大小与水流流态(即雷诺数)和坡度相关,Gang Li^[16]等进一步研究发现,当坡度在 2.7°~10°、雷诺数在 1 900~12 600 时,修正系数 α 与坡度和雷诺数间的关系可表示为

$$\alpha = -0.25 - 0.327 \log S + 0.144 \log Re \quad (1)$$

式中 S 为坡度; Re 为水流雷诺数。上述研究表明,无论用何种手段测定水流速度,都需对水流流态进行监测,根据具体情况选择适当的修正系数,计算水流平均速度。

2.2 坡面流流速

国内外对坡面流流速进行了大量的研究工作,这里仅对其中具有代表性的工作作以分析和总结(表 1)。1978~1988 年江忠善^[17]在全面收集国内外坡面流流速的基础上,结合自己的试验数据,对经验公式 $V = Kq^n S^m$ 进行了统计分析,得到黄土区坡面流速公式。结果表明坡面流流速随着流量的增大而增大,随着坡度的增大而增大,但流量对流速的影响大于坡度。陈国祥^[18]认为从实用观点出发,对于典型的坡面流(宽、浅、小雷诺数、缓坡),水流速度是坡度和流量的幂函数。在国外,Guy^[19]对坡面流流速进行了系统研究,研究结果表明坡面流流速不但随着坡度和单宽流量的增大而增大,而且水流比重和粘滞系数也对坡面流流速存在明显影响。

侵蚀细沟出现以后,坡面流横向汇集,径流动力特征发生显著变化。但由于细沟水流特征

较为复杂,因而研究较晚。1984年 Foster^[12]首次利用模拟细沟研究了侵蚀细沟的流速分布特征,研究表明流速沿细沟呈正态分布,流速主要受流量和坡度影响。1992年 Govers^[20]通过系统的室内试验发现,当坡度为 $2^{\circ} \sim 8.1^{\circ}$ 、流量为 $0.032 \sim 1.21 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,对于粉壤土而言,细沟流流速仅为流量的函数。这一结论对传统水文学和土壤侵蚀物理模型提出了严峻的挑战,因为无论是层流的谢才公式,还是紊流的曼宁公式,流速均是坡度的函数,而这两个公式是流速计算和侵蚀模型建立的基础。针对这一问题,Abrahams^[21]在南 Arizona 进行了一系列径流冲刷试验,虽然他的研究结果表明细沟流流速是流量、坡度、细沟糙率、土壤中大于 2 mm 颗粒百分数的函数,但因为试验条件与 Govers 的条件相差甚远,因而无法直接对 Govers 的结论进行检验。Nearing^[22,23]的试验结果虽与 Govers 的结果稍有差异,但结论仍然一致。因此,对于侵蚀细沟的水动力特征仍需进行系统研究,分析坡度对细沟水流流速、水流阻力的定量影响。

表1 坡面流平均流速的计算公式

Table 1. Formula for average velocity of overland flow

研究者	时 间	径流类别	资料来源	研究成果	参数意义
江忠善	1988	坡面流	收集国内外坡面流流速试验资料并进行了野外试验	$V = 2.09 q^{0.5} S^{0.35}$	q 为单宽流量 S 为坡度
陈国祥	1992	坡面流	室内变坡水槽冲刷试验	$V = CS^a q^b$	C 、 a 、 b 为常数
Guy	1987	坡面流	野外人工模拟降雨试验	$V = [rs / (3\mu)]^{1/3} q^{2/3}$	r 为水流比重 μ 为粘滞系数
张科利	2000	细沟流	室内变坡水槽冲刷试验	$V = 5.544 Q^{0.2636} S^{0.2511}$	Q 为流量
Foster	1984	细沟流	模拟细沟径流冲刷试验	$V = 16.0 Q^{0.28} S^{0.48}$	Q 和 S 同上
Govers	1992	细沟流	收集文献资料	$V = 3.52 Q^{0.294}$	Q 为流量
Nearing	1999	细沟流	野外放水冲刷试验	$V = 9.802 Q^{0.459}$	Q 为流量
Abrahams	1996	细沟流	野外放水冲刷试验	$\log V = 0.733 + 0.3291 \log Q - 0.00178 \% G + 0.180 \log S - 0.188 \log M$	$\% G$ 为土壤中直径大于 2 mm 颗粒百分数, M 为细沟糙率

3 坡面径流分离过程控制方程

径流分离土壤、泥沙输移和沉积三个过程相互影响,相互制约,一般认为径流分离土壤的速率与输沙率呈反比,随着径流输沙率的增大,用于输沙的能量增加,相应的用于分离土壤的能量减小^[24]。多数研究者认为特定断面处径流分离速率是径流挟沙力和实际输沙率的函数^[2,25],其关系可用 Foster 和 Meyer^[26]提出的关系式表示

$$D_r / D_c + q_s / T_c = 1 \quad (2)$$

式中 D_r 为径流分离速率; D_c 为径流分离能力; q_s 为径流输沙率, T_c 为径流挟沙力。(2)式表明细沟径流分离速率 D_r 受径流输沙率的限制,随着输沙率的增大而分离速率下降,当输沙率达到挟沙力 T_c 时,分离速率 D_r 为 0。与此相反,输沙率小于挟沙力时,径流分离土壤,当输沙率 q_s 为 0 时,径流分离土壤的速率为径流分离能力 D_c 。Nearing^[1]对(2)式进行了简单的分析,他的试验表明在水流分离土壤、泥沙输移过程中确实存在上述两种特殊情况,但其具体变化过程尚无试验证明,(2)式是将其进行线性化处理的结果。

作为许多侵蚀模型控制方程的(2)式,并不是所有研究者都认可的。Borah^[27]、Rose^[28]认为只有分离过程受(2)式控制,分散土壤颗粒进入径流的过程不受(2)式的控制。Kemper^[29]发现径

流分离过程与土壤质地紧密相关,对粘性土壤而言,输沙率增大会引起分离速率的增大。而 Moore 和 Burch^[24]认为输沙率仅对与侵蚀力相关的部分过程起限制作用,原因是部分侵蚀力被用于泥沙输移。

影响径流分离土壤过程的因素很多,总体而言可以分为水力参数、土壤参数和细沟特征三大类。水力参数包括水流形态、水深、流速、流量、层流厚度、切应力、温度、水流比重。土壤参数包括土壤类型、土壤可蚀性因子、土壤比重、土壤粘结力、土壤阻力、土壤颗粒构成及沉降速度等。细沟特征包括细沟长度、坡度、宽度、边壁坡度、细沟数量和密度等。在过去的研究中应用最多的水力参数包括:水充切应力($\tau = \gamma RJ$)、水流功率^[30]($\omega = \tau v$)、单位水流功率^[31]($P = v * S$)及 Darcy-Weisbach 阻力系数($f = 8gSR/V^2$)。

4 径流分离能力

径流分离能力是指特定水动力条件下清水分离土壤的能力,它表征了径流分离土壤的最大可能性,因而是径流分离过程控制性参数之一。对其研究最初是建立在切应力和临界切应力之差的基础上^[32],只有当径流切应力大于临界切应力,且径流输沙率小于径流挟沙力时才会出现径流分离过程,而分离速率与径流切应力和临界切应力之差呈正比,如表 2 中 Foster 的公式。该式的最大缺点是没有足够的理论基础,属经验公式,除切应力外,其余所有参数均无法代表任何特定水流和土壤,所以在侵蚀过程中无法预测^[33]。

表 2 径流分离能力计算公式

Table 2. Formula for runoff detachment capacity

研究者	时 间	径流分离能力表达式	参数含义
Foster	1972	$D_c = K_d (\tau - \tau_c)^{3/2}$	K_d 为土壤可蚀性参数, τ_c 为临界切应力
Nearing	1989	$D_c = K_d (\tau - \tau_c)^a$	K_d 为土壤可蚀性参数, τ_c 为临界切应力, a 经验参数。一般研究中 K_d 可定为常数,它仅与土壤性质有关,而与水流特征无关
Elliot	1993	$D_c = K_d (\omega - \omega_c)$	K_d 为土壤可蚀性参数, ω_c 为临界水流功率
EUROSEM	1998	$D_c = \gamma V_i C (SV - 0.4)^d$	γ 为效率系数, COH 为土壤粘结力, V_i 为
LISEM	1996	$\gamma = 1 / (0.89 + 0.56COH)$	土壤颗粒沉降速度, C 和 d 为经验参数
Nearing	1999	$D_c = 0.00129 \omega^{2.043}$	ω 为水流功率
蔡强国	1995	$D_c = 1.766 * 10^{-7} \omega^{4.8} \lambda^{-0.5}$	ω 为水流功率, λ 为基准状态下的抗剪强度
张科利	2000	$D_c = 8.18 * 10^{-4} (\tau - 7)$	τ 为切应力

为建立土壤侵蚀物理模型,1991 年 Nearing^[34]首次用变坡水槽,在实验室对径流分离速率与坡度、水深和土壤中值直径间的关系进行了模拟,结果表明分离速率不是切应力的单一函数,也不是水流功率的单一函数,坡度对分离速率的影响大于水深,他用水流冲击波理论对试验结果进行了分析。因素动水流冲击波的存在,引起局部切应力的增大,因而在平均水流切应力比土壤阻力小的情况下也会发生分离过程^[35]。Elliot 和 Laflen^[36]将细沟侵蚀分为冲刷、沟头下切、侧蚀和剥蚀四部分,而分离能力则是各个分量的总和,他们发现水流功率能够准确地预测分离能力。在欧洲的 EROSEM^[37]和 LISEM^[38]模型中,径流分离能力被定义为单位水流功率的函数,其理论基础是 Govers 的室内实验^[39]。

国内开展的相关研究较少,且均以国外理论为基础。蔡强国^[4]在黄土高原丘陵沟壑区羊道沟进行了大量的野外试验后发现,径流分离能力与水流功率呈幂函数相关,同时土壤抗剪强度

也对径流分离能力存在影响。张科利^[41]利用变坡水槽也研究了黄土条件下的径流分离能力。通过上述分析表明径流分离土壤的过程十分复杂,究竟用何种水力参数可准确描述这一过程,有待于系统深入的试验研究。但很多研究中常采用 Foster 和 Meyer^[26]的坡地径流分离能力简化公式

$$D_c = K_d \tau^{3/2} \quad (3)$$

5 水流挟沙力

水流挟沙力 T_c 是径流分离土壤、泥沙输移的控制参数之一,长期以来备受关注,许多输沙公式是在河流条件下建立的,由于河流和坡面侵蚀水流特征不同,一般都需进行修正,但使用过程中仍存在误差。Foster 和 Huggins^[42]在研究凹坡泥沙沉积时发现, Dubois 输沙公式形式简单,并包含了临界切应力的概念,可以用于坡面径流挟沙力的计算。Alonso^[43]对建立在河流、水槽和凹形坡面上的 9 种挟沙力公式进行检验后认为, Yalin 公式可以满足坡面径流的输沙过程。Julien 和 Simons^[44]分析了 14 种泥沙输移公式后认为,大多数建立在河流条件下的输沙公式无法准确地预测坡面径流挟沙力,建议应用坡度、流量和切应力的幂函数计算坡面径流挟沙力。Lu 等^[45]在研究沙土和粉壤土输沙关系时发现,用 Bagnold、Cassol、Einstein、Engelund-Fredsoe、Meyer-Peter 和 Muller 等公式分析的结果相近。

表 3 坡面流挟沙力计算公式

Table 3. Formula for sediment transport capacity of overland flow

研究者	时 间	挟沙力计算公式	参数含义
Foster	1976	$T_c = A\tau (\tau - \tau_c)$	A 为参数, τ_c 为临界切应力
Julien	1985	$T_c = AS^{1.31} q^{1.93}$	A 为参数, q 为单宽流量, S 为坡度
Govers	1990	$T_c = Aq^B S^C$	A、B、C 为参数, q 为单宽流量, S 为坡度
Govers	1992	$T_c = 8360 (3.52SQ^{0.294} - 0.0074) Q$	S 为坡度, Q 为流量
Abrahams	1998	$\log T_c = -3.038 + 1.726 \log (\omega - \omega_c) - 1.212 \log d$	ω 为水流功率, ω_c 为临界水流功率, d 为水深
蔡强国	1995	$T_c = 0.0081 \omega^{1.55}$	ω 为水流功率

一般而言,因坡面流水深很小,很难用河流挟沙公式计算坡面流挟沙力, Govers 和 Rauws^[46]研究了土壤切应力和单位水流功率对挟沙力的影响,结果表明用切应力和单位水流功率可以预测径流挟沙力,建议使用单位水流功率,因为该参数容易确定。然而 Abrahams^[47]、Gary^[48]等近期的研究表明,水流功率更能准确描述坡面流挟沙力。

6 坡面径流分离土壤过程水动力学研究展望

6.1 试验方法

坡面水蚀水动力学研究应将室内和室外试验进行有机结合,室内试验有助于对坡面水蚀物理过程的理解,而室外试验是对室内试验结果的检验和拓展。室内试验应以变坡水槽结合模拟降雨为主,应尽量提高试验设备的自动化程度。室外试验应注意试验小区的标准化^[49],提高试验数据的可比性^[50]和可靠性。在强化微观(机理)研究的同时,应加强宏观研究,通过区域对比研究物理参数的区域规律。

6.2 研究内容

径流分离土壤是坡面水流在特定水动力条件下的必然结果,因而研究坡面径流分离土壤的水动力条件,是研究坡面水蚀机理、过程、建立侵蚀预报模型及水土保持措施配置的基础,具有十分重要的意义。就研究内容而言,应重视如下几个方面:(1)作为许多土壤侵蚀模型分离过程控制公式的(2)式,是线性化的结果,其具体变化过程尚不清楚,有待于深入研究。(2)用定床和动床所获得的研究结果不尽相同,主要差异表现在水流阻力的组成和相对大小,进而对水流形态的影响,今后的研究应以侵蚀动床为主。(3)水深和坡度是影响坡面径流分离土壤过程最基本的水力参数,是通过何种组合影响径流分离速率、分离能力、挟沙力,即径流分离过程和输沙过程究竟是切应力、水流功率还是单位水流功率的函数,或者是另一种水深和坡度的组合形式的函数,目前尚不清楚,今后的研究应以此为主攻方向。(4)坡度对水流阻力、流速影响的结果不尽相同,同时几乎所有国外的相关试验都是在 20% 坡度以下进行的,而在我国 20% 坡度以上的坡耕地占的比例还较大,是水土保持工作的主要对象,因此,国外现有的研究成果在国内应用以前必须进行陡坡条件的检验、校正和扩展。

参考文献:

- [1] Nearing M A, Lane L J, Albert E E, *et al.* Prediction technology for soil erosion by water: Status and research needs[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54(6): 1 702 - 1 711.
- [2] Hirschi M C, Barfield B J. KYERMO-A physically based research erosion model. Part I: Model development[J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(3): 804 - 813.
- [3] 沙际德, 蒋允静. 试验初生态侵蚀性坡面剥层水流的基本动力特性[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 29 - 35.
- [4] 谢承迪. 坡面流类型及坡地水力侵蚀计算方法[J]. 水土保持通报, 1999, 19(4): 1 - 6.
- [5] 朱显谟. 甘肃中部土壤侵蚀调查报告[J]. 土壤专报, 1958, 32: 53 - 109.
- [6] 蒋定生. 黄土区不同利用类型土壤抗冲能力的研究[J]. 土壤通报, 1979, (4): 20 - 29.
- [7] 蒋定生, 李新华, 范兴科, 等. 黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平变化和垂直变化规律[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 1 - 8.
- [8] 刘国彬, 张光辉. 原状土冲刷法与人工模拟降雨法研究土壤抗冲性对比分析[J]. 水土保持通报, 1995, 15(4): 37 - 41.
- [9] 胡世雄, 靳长兴. 坡面动力侵蚀过程的实验研究进展[J]. 地理科学进展, 1999, 18(2): 103 - 110.
- [10] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11: 653 - 657.
- [11] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow[J]. Soil Technology, 1992, 5: 289 - 301.
- [12] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics. I: Velocity relationships[J]. Transactions of ASAE, 1984, 27(3): 790 - 796.
- [13] Horton R E, Leach H R, Vliet V R. Laminar sheet-flow[J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1934, 15: 393 - 404.
- [14] Emmett W W. The hydraulics of overland flow on hillslopes[J]. U S Geological Professional Paper, 1970, 662-A, A-1-A-68.
- [15] King K W, Norton L. Methods of rill flow velocity dynamics[A]. American Society of Agricultural Engineering Meeting Presentation Paper[C], 1992, 92 - 2 542.

- [16] Gang Li, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. *Earth surface Processes and Landforms*, 1996, 21:509 – 515.
- [17] 江忠善, 宋经文. 坡面流速的试验[A]. 西北水土保持研究所集刊第7集[C], 1988.
- [18] 陈国祥. 土壤侵蚀与流域产沙的物理过程及预报模型[A]. 全国泥沙基本理论研究学术研讨会会议论文集[C], 北京: 中国水利水电出版社, 1995, 214 – 249.
- [19] Guy B T, Dickinson W T, Rudra R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow[J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5):1 378 – 1 387.
- [20] Govers G. Relationships between discharge, velocity, and flow area for rills eroding loose, non-layered materials[J]. *Earth Surface Processes Landforms*, 1992, 17:515 – 528.
- [21] Abrahams A D, Li G, Parsons J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21:35 – 47.
- [22] Nearing M, Norton L, Bulgakov A, *et al.* Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(4):865 – 876.
- [23] Nearing M, Simanton R, Norton D, *et al.* Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24:677 – 686.
- [24] Moore I D, Burch G J. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22:1 350 – 1 360.
- [25] Ewing L, Mitchell K. Overland flow and sediment transport on small plots[J]. *Transactions of the ASAE*, 1986, 29(6):1 572 – 1 581.
- [26] Foster G, Meyer D. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In *Sedimentation: Symposium to Honor Professor H A Einstein*, ed. W Shen[M]. 12.2 – 12.9 Fort Collins, Colo.: Water Resources Publications, 1972.
- [27] Borah D. Sediment discharge model for small watersheds[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(3):874 – 880.
- [28] Rose C, Williams R, Sander C, *et al.* A mathematical model of soil erosion and deposition processed: I. Theory for a plane land element[J]. *Soil Sci Soc of Am J*, 1983, 47(5):991 – 995.
- [29] Kemper W, Trout J, Brown J, *et al.* Furrow erosion and water and soil management[J]. *Transactions of the ASAE*, 1985, 28(5):1 564 – 1 572.
- [30] Bagnold R. An approach to the sediment-transport problem from general physics[R]. U S Geol Surv Prof Paper, 1966, 422 – 437.
- [31] Yang C. Unit stream power and sediment transport[J]. *Journal of the Hydraulics Division, ASAE*, 98(HY10), Proc Paper 9295, 1972, 1 805 – 1 826.
- [32] Nearing M, Foster R, Lane J, *et al.* A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 32(5):1 587 – 1 593.
- [33] Owopuit L, Stolte J. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(4):1 099 – 1 110.
- [34] Nearing M, Bradford M, Parker C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J]. *Soil Sci Soc of Am J*, 1991, 55(2):339 – 344.
- [35] Nearing M. A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow[J]. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34(1):81 – 85.
- [36] Elliot W, Laflen M. A process-based rill erosion model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1993, 36(1):65 – 72.
- [37] Morgan R, Quinton N, Smith E, *et al.* The European Soil Erosion Model(EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23:527 – 544.

- [38] De Roo A, Wesseling G, Ritsma G. LISEM: A single-event, physical based hydrological and soils erosion model for drainage basin. I: theory, input and output[J]. *Hydrological Processes*, 1996, 10:1 107 - 1 117.
- [39] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow: Erosion, transport, and deposition process [M]. LAHS Publ, 1990, 189, 45 - 63.
- [40] 蔡强国. 小流域侵蚀产沙过程模型[A]. 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995, 233 - 238.
- [41] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1): 9 - 15.
- [42] Foster G, Huggins F. Deposition of sediment by overland flow on concave slopes[M]. *Soil Erosion: Prediction and Control*, Soil Conservation Society of American, Ankeny, Iowa, 1976.
- [43] Alonso C, Neibling H, Foster R. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling[J]. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24(5): 1 211 - 1 220.
- [44] Julien P, Simons B. Sediment transport capacity of overland flow[J]. *Transactions of the ASAE*, 1986, 28(3): 755 - 762.
- [45] J Y Lu, Cassol A, Foster R, *et al.* Selective transport and deposition of sediment particles in shallow flow[J]. *Transactions of the ASAE*, 1988, 31(4): 1 141 - 1 147.
- [46] Govers G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11: 515 - 524.
- [47] Abrahams D, Gary Li. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23: 953 - 960.
- [48] Gary Li, Abrahams D. Controls of sediment transport capacity in laminar interrill flow on stone covered surfaces[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(1): 305 - 310.
- [49] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. *自然资源学报*, 1999, 14(4): 345 - 350.
- [50] 雷阿林. 土壤侵蚀模型试验的原型选定问题[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(3): 60 - 65.

Advances in Study of Runoff Detachment Processes Based on Hydraulics

ZHANG Guang-hui

(Dept. of Resources and Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Runoff detachment is one of principal sediment resources, and also is one of dominant parameter for soil erosion modeling. This paper reviews research method, mean flow velocity measurement, dominates equation, detachment capacity and transport capacity in the runoff detachment processes, which aim at to introduce researched results and experiences and to advance relative researches in China.

Key words: overland runoff; detachment processes; hydrodynamics