

坡面侵蚀产沙模型的研究*

蔡 强 国

(中国科学院 地理研究所)
(国家计划委员会)

提 要: 纵观近几十年来坡面侵蚀产沙模型研究, 将其按经验模型与理论模型
分别阐述其发展, 评述主要模型的贡献, 以及有待深入研究的问题。

主题词: 经验模型 通用土壤流失方程 理论模型

坡面是径流与侵蚀产沙的主要源地。黄河入海的细颗粒泥沙, 相当部分来自坡耕地表土。某些流域的坡耕地土壤流失量占全流域总流失量的一半以上^[1]。坡面上的径流与泥沙如果能全部拦蓄不下沟, 则沟谷地的径流量与泥沙量显著减少^[2]。坡面是土壤、地貌、水文学家研究的重要领域。1877年德国土壤学家Wollny首先定量研究土壤侵蚀。一个多世纪以来, 各国学者为研究土壤侵蚀规律作了大量工作, 尤其是近几十年来, 模型研究和模拟技术越来越受到人们的重视。目前坡面侵蚀产沙模型的研究一般分为两大类: 一类是经验研究, 它包括经验模型、参数模型; 另一类是理论性研究, 一般建立理论模型。以下分述之。

一、经验模型

我国从四十年代初, 开始对坡面侵蚀进行定量观测。1953年刘善建根据十年的径流侵蚀小区资料, 首次提出了计算年度坡面侵蚀量的公式^[3]。六十年代, 张存福建立了黄河中游地区坡耕地土壤流失预报方程, 并引入了植被度因素¹⁾, 以上是我国早期的坡面侵蚀模型。周佩华等根据观测资料计算降雨动能, 得到计算年度坡面侵蚀量的回归方程式²⁾。江忠善等分析西峰水土保持试验站资料, 建立了单位面积侵蚀量与坡面坡度、降雨能量指标的关系^[4]。以上工作注意了能量在模型中的地位和作用。孟庆枚、牟金泽用黄土丘陵沟壑区各水土保持试验站的径流小区实测资料, 建立了一个预报每次降雨的土壤流失方程, 较全面地考虑了各种影响侵蚀产沙的因素, 虽然推广应用尚有局限性, 但在国内是首次尝试³⁾。坡面侵蚀产沙规律的研究工作, 在全国其它地区也在深入进行。周国忠等建立了每次降雨时坡面土壤流失

本文1987年10月20日收到, 1988年8月21日收到修改稿。

* 本文为中国科学院地理研究所所长基金“地表能量转化和物质迁移规律研究”内容。

1) 张存福: 黄河中游坡耕地土壤流失预报, 1964年。

2) 周佩华、孙清芳、刘炳武: 黄土地区影响坡面侵蚀主要因素的初步分析, 黄土高原水土流失综合治理科学讨论会资料汇编, 1981年。

3) 孟庆枚、牟金泽: 黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀和沟道输沙量计算, 1930年。

量的预报方程^[5]。杨艳生等根据江西省局部地区资料探讨应用逐步回归分析方法建立坡面侵蚀方程式的问题，并应用模糊数学于坡面土壤侵蚀预报^[6]。

本世纪二十年代以来，苏联的坡面侵蚀研究得到较大的发展。三十年代，Я.В. Кор-мнев建立了一个单宽坡面土壤流失量方程^[7]。六十年代В.В. Сластухин提出的坡面侵蚀方程^[8]，引入了表面糙率、坡面形态和集水类型等因素。Г.И. Швец将能量与植被因子引入土壤流失方程^[9]。七十年代又提出了一个计算雨季洪水期输沙量的坡地侵蚀模型，注意到下垫面的可蚀性研究。对不同的坡面形态（凸形坡、凹形坡、直线形坡）采用不同的计算公式。

类似的土壤侵蚀研究工作在欧洲和非洲各国也得到较深入开展。在六十年代初，N.W. Hudson通过对非洲侵蚀性降雨的深入研究，建立了土壤侵蚀量与土壤类型、坡度、坡长、农业管理、水土保持措施和降雨等因素之间的关系^[10]。H.A. Elwell的SLEMSA模型^[11]，把土壤侵蚀环境分为四个自然系统：气候、土壤、作物和地形，并将四个系统子模型有机地结合起来，构成一个完整的坡面土壤流失模型，使研究更加接近于自然环境，模型较快地在南非地区得到应用推广。

纵观五十年代以来，世界各国学者利用相关分析和数理统计方法建立了大量坡面侵蚀产沙模型，对某些局部地区侵蚀产沙的定量化研究大有益处。为了更好地综合分析对坡面土壤侵蚀的影响因素并使之更易于推广应用。越来越多的学者重视建立综合性的模型，SLEMSA模型和美国通用土壤流失方程的广泛应用就是很好的例子。

二、通用土壤流失方程及其修正

美国的土壤侵蚀定量研究始于1914年，M.F. Miller建立径流侵蚀小区。1940年A.W. Zingg建立了土壤侵蚀率与坡度、坡长的关系，D.D. Smith评价了作物和水土保持措施因素对侵蚀的影响，首先提出了土壤允许侵蚀量的概念，使土壤侵蚀和水土保持措施研究有了定量评价标准。Browning等人又增补土壤可蚀性和经营管理因子。在此基础上，G.W. Musgrove建立了适用于估算各种农地侵蚀量的方程式，这是通用土壤流失方程的雏形，该方程在美国应用近十年。五十年代后期，美国径流和土壤流失资料中心在Purdue大学的协作下，用计算机对美国洛基山以东49个地区近三十年的10000多个小区年的基本资料进行统计分析和系统研究，得到了一个经验性的土壤流失方程^[12]： $A = R \times K \times LS \times P \times C$ 。式中：A为土壤侵蚀量，R为降雨侵蚀力，K为土壤可蚀性，LS为地貌因素，P为水土保持措施，C为作物管理。这个方程的形式简单，仅为几个因素的相乘，但基本包括了影响坡面土壤流失的主要因素，把大量经验性结果定量化，摆脱了早期模型的地区限制。这是迄今为止在世界上得到最广泛应用的坡面侵蚀产沙模型，称之为通用土壤流失方程。加拿大、秘鲁、澳大利亚、比利时、尼日利亚、津巴布韦、北非、中东、日本等均报道了该方程在当地的应用情况和对该方程的修正。我国一些刊物先后对通用土壤流失方程做了介绍，部分学者对该方程在我国某些地区的应用作了尝试^[13]。但此方程的通用性仍是有限的。例如，我国黄土高原属大陆性季风气候，土壤的严重流失主要与夏季几次侵蚀性暴雨密切相关^[14]。黄土高原丘陵沟壑区地面切割破碎，坡度陡，坡面形态复杂，地貌因子对土壤侵蚀的影响有不同的规律性^[15]。正

如通用土壤流失方程的提出者W.H. Wischmeier本人所指出的^[16]：不能清楚理解方程式的确切意义和局限性，就会导致错误的应用结果。

很多学者针对各地具体情况，对方程进行了修正和发展。N.W. Hudson指出存在一个临界侵蚀降雨强度，当降雨大于这个雨强时才会产生侵蚀，在非洲该值约为1 in/h (25mm/h)，因此，他提出了降雨侵蚀力指标 $KE > 1$ ，即表示高于1 in/h降雨的总能量^[17]，这个指标更适于热带和亚热带的降雨情况。坦桑尼亚和马来西亚的研究表明这种结论是正确的。在英国和西德，此值分别为10mm/h和16mm/h。在比利时，仅为1.3mm/h^[13]。M.A. Stocking的研究表明，对于有稀疏和稠密复盖的地方，分别用最大15分钟和最大5分钟雨强指标比较适宜^[19]。R. Lal认为在尼日利亚， AI_{Im} 指标较 EI_{30} 指标与土壤流失有更好的相关性，其中A为降雨量，Im表示7.5分钟最大雨强^[20]。还有些学者应用动量、动能、降雨深等指标来描述降雨因子，但均有很大局限性，只能是在局部地区某一指标比其它指标好，都很难在大范围内应用。通用土壤流失方程在计算上的误差，在一定程度上还由于所用的坡长—坡度因子不能很好地说明坡面上的泥沙输移机制。I.D. Moore等根据理论推导得到的坡长—坡度因子，能较好地解释复杂坡面几何特征的变化和描述坡面侵蚀土壤输移特征^[21]，对方程的修正有重要的理论意义。

笔者在访问加拿大期间得知，加拿大农业部和一些大学都在研究适合于本地区的土壤侵蚀模型。例如，Guilph大学的W.T. Dickinson教授认为通用土壤流失方程中的降雨、土壤可蚀性、植被与作物因子在不同的季节，数值上有较大变化，土壤侵蚀与搬运规律也因季节不同而异，因此建立了一个适用当地不同季节的土壤侵蚀预测模型GAMES。使土壤侵蚀量的计算精度有所提高。G.R. Foster等为估算某次具体降雨侵蚀产沙量，根据土壤侵蚀原理对通用土壤流失方程中每项进行综合分析^[22]，认为地形因子应该随降雨、季节、年度、地区、地面坡度和坡长的不同而不同，并将径流侵蚀因子与降雨侵蚀因子合并为侵蚀力因子。

通用土壤流失方程以及类似的坡面侵蚀模型，使用比较方便，给水土保持工作提供了一种有用的工具，但是它们不能把坡面侵蚀作为一个动态过程来描述，也难以阐述土壤沿坡面的移动过程。美国农业部投入很大力量并希望于1992年得到广泛应用的水蚀预报计划(WEP P)，正是朝着这个方向在努力^[23]。

三、理论模型

坡面侵蚀产沙的近期研究更多的集中于侵蚀机制。从大量的观测和定量的描述入手，根据可靠的物理基础，形成理论并建成模型。黄秉维总结近期的大量研究结果，根据水力侵蚀的机制认为，坡面上的降雨径流侵蚀分两步进行，首先是土粒与土体分离，其次是与土体分离的土粒被搬运走。有三种侵蚀力，一是雨滴的打击，二是坡面片状水流，三是坡面上细沟中的水流，以细沟水流侵蚀力最大，雨滴侵蚀力次之，片状流水侵蚀力最小^[24]。目前坡面侵蚀方面的理论研究，主要集中于模拟以上三种侵蚀力机制以及与它们有关的土壤分离与搬运规律。

本世纪四十年代，W.D. Ellison揭示了雨滴在水蚀过程中作用。认识到植被复盖使雨滴

失去侵蚀动能。雨滴特征和能量、降雨强度、降雨侵蚀力等对坡面侵蚀的影响,成为土壤侵蚀机制研究的重要内容^[25],为建立有物理基础的坡面侵蚀产沙模型打下了良好的基础,促使美国以工程措施为主的防治体系逐步与植被措施和农业耕作措施结合起来。R.E.Horton提出径流冲刷模型,指出只有当径流冲刷强度大于地面的抗蚀力,离分水岭一定距离,才会出现坡面侵蚀,提出了“发生侵蚀的临界坡长”与“临界拖曳力”概念^[26]。他未能考虑降雨击溅侵蚀的影响,得出存在“无侵蚀带”的结论。R.E.Horton的坡面侵蚀理论现在仍然是一些坡面侵蚀模型和对坡面数学模拟的重要基础^[27]。

依据坡面上降雨径流侵蚀过程,L.D.Meyer等的模型把坡面上的降雨径流侵蚀分解成四个独立而又相互联系的亚过程:(1)降雨对土壤的分散,(2)降雨的搬运,(3)径流对土壤的分散,(4)径流搬运。每个亚过程用水力学、水文学、地貌学和相应物理关系来描述。将计算得到的总的土壤分散量与总的搬运能力比较,从而决定降雨径流向下坡搬运的侵蚀量^[28]。这个模型未能考虑降雨与径流的交互作用,得到的侵蚀率不连续,难以描述和模拟复杂的坡面降雨径流侵蚀过程,但它提出了模拟坡面侵蚀的一种基本形式,为近期出现的众多坡面侵蚀模型奠定了基础。

G.R.Foster等根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二部分,细沟间侵蚀与细沟侵蚀。细沟间侵蚀率用降雨特征值,地形和土壤可蚀性等表示;细沟侵蚀率则以水流特征值和不同的地形和土壤因素表征,两者之和则是总的坡面降雨径流侵蚀率。虽然把溅蚀与坡面径流侵蚀合并为细沟间侵蚀,对建立模型是很有用的,可是模糊了这些侵蚀过程的差异,忽略了它们对细沟侵蚀初始阶段的影响。但是它很快为很多学者所接受,并开展了对这类模型的深入研究,从而得到较快发展^[29]。一些学者对影响细沟间侵蚀的降雨、土壤和坡面特性进行详细探讨^[30],并引入了土壤剪切强度因子^[31]。L.E.Gilling等利用实验室取得的资料对模型进行验证,使理论模型研究与实验资料紧密结合,取得了较好的结果^[32]。比较高的坡面产沙量总与细沟侵蚀密切相关,野外调查与试验表明,坡面上有细沟发育时,坡面侵蚀产沙常增大数倍至数十倍¹⁾。所以一个有效的坡面侵蚀模型应对细沟侵蚀过程有较为清楚的描述或模拟。为研究细沟内水流侵蚀力特性以及与有关因素的关系。G.R.Foster在实验室内利用细沟定床模型得到一批很有价值的细沟水流实测资料^[33]。E.M.Mervitl据室内实验资料将细沟在坡面上的形成过程分为4个阶段:片流、线性水流发育、隐细沟、有沟头侵蚀的细沟^[34]。柏谷健二建立了坡面上细沟发育的随机模型,方程的稳定状态解可以给出坡面上最可能的细沟发育数量²⁾。J.Sarat等认为径流水动力增加是细沟发育的主要原因,试验资料表明,当坡面径流的福诺德数为2—3时,细沟发育的机率很大^[35]。黄土高原的调查以及室内模拟降雨试验结果表明,当坡耕地在降雨过程中形成表土结皮时,坡面径流量和侵蚀产沙量可增加数倍^[36],其主要原因是,表土结皮使水流渗入减小,坡面径流水动力增加,在坡面发生细沟侵蚀的可能性大大增加,表土结皮对坡面侵蚀产沙的影响,受到越来越多学者的关注^[37]。在比利时召开了评价表土结皮的国际讨论会,探讨了不同土壤形成表土结皮的可能性和机制、表土结皮的特性和在土壤侵蚀中的作用。但

1) 蔡强国等:表土结皮对坡面产流侵蚀产沙的影响,1986年。

2) 柏谷健二:论坡面上的细沟网,(陈永宗译自日本地理访华团学术报告)。

是表土结皮在坡面侵蚀产沙模型中的作用还未受到应有的重视。

土壤抗蚀力因子在坡面侵蚀产沙模型中的作用历来受到人们的重视。近几十年来,提出了各种形式土壤抗蚀力指标,却极少能被广泛接受。所以不少学者开始致力于研究有一定物理基础的土壤抗蚀力指标。但是世界上土壤类型繁杂,影响土壤抗蚀力的因素很多,要寻找一个通用土壤抗蚀力指标是不可能的。近期一些学者正在进行土壤抗剪力的研究。R.M. Gruse和M.M. Al-Durrah 指出降雨溅蚀量与土壤抗剪力有密切关系^[38]。S.H. Luk通过试验和野外观测资料探讨了土壤抗剪力对坡面降雨径流侵蚀的影响^[39]。但是,正如M.J.M. Romkens 等所指出的土壤抗剪力的变化与土壤侵蚀过程之间的关系仍然是一个需要深入探讨的课题。所以研究与土壤抗蚀力有关的各种土壤特性是重要的试验项目,成为深入研究坡面侵蚀产沙机制的关键。

为了得到有效的模型,确定合适的物理基础是非常重要的。M.J. Kirkby认为在坡面侵蚀模拟中最可靠的基础是质量平衡方程,因为在机械系统中存在大量摩擦发热,所以应用能量与动量平衡往往很困难。另一个基础是在泥沙输移过程中,分散、搬运与沉积的关系^[40]。在以上基础上,他对溅蚀模型、径流冲刷模型、细沟侵蚀模型、细沟间侵蚀模型,以及细沟侵蚀与细沟间侵蚀的关系进行了深入研究,促进了坡面侵蚀理论的发展。R.P.C. Morgan 等建立的新模型^[41],将土壤侵蚀过程分为径流与产沙两个方面。对每一部分的计算方程尽可能考虑产流产沙机制,模型附有计算程序。对12个国家 67 个地区的年度径流侵蚀产沙量观测值进行计算,验证模型是有效的。

M.A. Carson等将坡面侵蚀搬运速率的空间变化和坡地剖面发育的序列联系起来,即把过程和形态联系起来,引用室内试验与野外资料,对某些短期坡面过程和一个地区的坡面形态进行研究,建立坡面降雨径流侵蚀的过程—响应模型。根据长期的气候资料可以预报坡面形态的发育过程^[42]。F. Anert对三维过程—响应模型进行研究得到SLOP3D模型,这是一个综合性侵蚀理论模型,最近经过对其程序的修正,能用于分析野外观测资料,提高了模型的实用性^[43]。L.D. Moore等把C.T. Yang提出的单位水流动力理论应用于研究坡面侵蚀产沙,描述和分析面蚀和细沟侵蚀时径流对泥沙的搬运能力,取得了较好效果^[44]。以上几个模型均从力学、水力学的基本原理出发,探讨和分析坡面侵蚀产沙过程。虽然处于探索阶段,但为理论模型的深入研究开辟新的途径。

国内对坡面侵蚀产沙机制和理论模型的研究正在开展。中国科学院地理研究所研究陕北的坡地侵蚀规律和天然林地的产流过程,对黄土坡耕地的水土流失计算方法作了探讨^[45]。周佩华等利用模拟降雨装置研究了降雨强度与降雨动能的关系^[46]。江忠善等根据野外资料分析天然降雨动能和雨强、雨滴数粒径的关系,建立了数学表达式^[47]。这些关系的建立为探讨黄土高原的降雨侵蚀机制,研究在坡面侵蚀模型中降雨因子的作用奠定了初步基础。蔡强国、陈浩等在模拟降雨条件下,研究了影响降雨溅蚀的各种因素,并进行一组五元正交试验,建立了表示降雨溅蚀分散量和向下坡搬运量的正交多元回归模型,分析了在降雨溅蚀过程中一系列影响因素的临界值变化¹⁾,为建立溅蚀理论模型做准备。王兴奎等研究黄土

1) 蔡强国、陈浩:降雨溅蚀的多元正交回归模型,1985年。

丘陵沟壑区的坡面侵蚀过程和机制,以实测资料揭示了降雨溅蚀在黄土高原坡面侵蚀过程中的重要作用^[48]。黄土抗蚀力低是导致强烈土壤侵蚀的重要原因,土壤抗蚀力的研究是一个有待加强的薄弱环节,朱显谟提出的土壤抗蚀性与土壤抗冲性^[49]对分析降雨溅蚀和坡面侵蚀过程有实际意义。黄秉维等一再强调土壤入渗率与土壤侵蚀的关系^[50],是研究坡面侵蚀机制的重要内容,是保水保土的关键。有关表土结皮形成机理的研究工作正在深入^[36、51]。细沟侵蚀调查历来受到很多学者的重视^[52],对细沟产生的条件、发育过程以及机理的研究工作已经取得了一些成果^[53、54]。承继成^[55]、陈永宗^[53]、蔡强国^[56]等分析了降雨、坡度、坡长对坡面侵蚀的影响,描述黄土丘陵沟壑区各种坡面形态与坡面径流侵蚀的关系,在定性描述和定量分析坡面侵蚀过程的基础上,进行了坡面侵蚀分带性研究。对于深入认识坡面侵蚀规律和坡面发育理论有重要意义。

模拟土壤侵蚀过程是进行模拟研究的目的,一个能揭示侵蚀机制的坡面侵蚀产沙模型,不但土壤学家和水土保持工作者十分感兴趣,对于地貌学家理解地形演化过程也是非常重要的。但是到目前为止,对坡面侵蚀产沙过程还缺乏深入了解,还没有较完善的坡面薄层水流侵蚀与泥沙搬运理论,一些经验模型和与通用土壤流失方程类似的估算技术,在实际应用中还占有主要地位。已建立的很多模型一般过于简化了研究对象和过程。目前还没有合适的指标表示地貌形态,尤其是微地形变化对坡面产流产沙的影响。由于还没有完善的有物理基础的土壤抗蚀理论,所以对土壤抗蚀力的估算是一个较大的难题。在坡面侵蚀产沙过程中,人为作用是一个难以定量分析的因素。所以,在一段时间内,建立一个有坚实物理基础,能被广泛用于估算坡面侵蚀产沙量的模型,仍是学者们奋斗的目标。

参 考 文 献

- (1) 唐克丽、郑世清等: 杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治, 水土保持通报, 第4期, 1984年。
- (2) 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, 第2期, 1980年。
- (3) 刘善健: 天水水土流失测验的初步分析, 科学通报, 1953年。
- (4) 江忠善、宋文经: 黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算, 北京河流泥沙国际学术讨论会论文集, 水利出版社, 1982年。
- (5) 周国忠、张春江: 铁岭市东部山区小坡面土壤流失量的估算方法, 中国水土保持, 第5期, 1985年。
- (6) 杨艳生、史德明: Fuzzy关系方程在土壤侵蚀预报中的应用尝试, 模糊数学, 第3期, 1984年。
- (7) Швец, Г.И.: Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка, Л., 1974.
- (8) Сластухин, В.В.: Вопросы мелиорации склонов Молдавии. Кишинев. «Карты Молдовейнска» 1964.
- (9) Швец, Г.И.: Вопросы расчета поверхностного смыва почв. В кн. Бруды III всесоюз. гидрол. съезда. 1.5. л., Гидрометеоиздат, с.355-360.
- (10) Hudson, N.W.: Soil conservation, Cornell University Press Ithaca, New York, 1961.

- [11] Elwell, H. A.; Modelling soil loss in Southern Africa. *J. Agric. Engng. Res.* Vol23, p117-127, 1980.
- [12] Wischmeier, W. H. and D. D. Smith; Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains—Guide for selection of practices for soil and water conservation. *Agricultural Handbook No. 282*, 1965.
- [13] 牟金泽、孟庆枚: 降雨侵蚀土壤流失预报方程的初步研究, 中国水土保持, 第6期, 1983年。
- [14] 王万忠: 黄土地区降雨特征与土壤流失关系的研究, 水土保持通报, 第4期, 1983年。
- [15] 陈永宗、景可、蔡强国: 黄土高原现代侵蚀与治理, 科学出版社, 1988年。
- [16] Wischmeier, W. H.; Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. soil and water Cons.* Vol. 31, p5-9, 1976.
- [17] Hudson, N. W.; 土壤侵蚀, 窦葆璋译, 科学出版社, 1971年。
- [18] Bollinne, A.; Provisional rainerosivity map of Belgium. in M. De Boet (ed), *Assessment of erosion*. Chichester John Wiley and Sons 1980.
- [19] Stocking, M. A. and H. A. Elwell; Prediction of subtropical storm soil losses from field plot studies. *Agric. Met.* Vol12, P193-201, 1976.
- [20] Lol, R.; Soil erosion on alfisols in western Nigeria, III, effect of rainfall characteristics. *Geoderma*, Vol16, P389-401, 1976.
- [21] Moore, I. D. and G. J. Burch; Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal* in press, 1986.
- [22] Foster G. R., L. D. Meyer and C. A. Onstad; A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Transactions of the ASAE*. Vol. 20, No. 4, 1977.
- [23] Foster, G. R. and L. J. Lane, User requirements USDA-water erosion prediction project (WEPP) 1987.
- [24] 黄秉维: 谈黄河中游水土保持问题, 中国水土保持, 第1期, 1988年。
- [25] Park, S. W., J. K. Mitchell and G. D. Bubenzer; splash erosion modeling: Physical analysis. *Transactions of the ASAE*. Vol25, No. 2, P357-361, 1987.
- [26] Horton, R. E.; Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysic al approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 56, P. 275-370, 1945.
- [27] Dunne, I. and B. F. Aubty; Evaluation of Horton's theory of sheetwash and rill erosion on the basis of field experiments. in A. D. Abrahams (ed) *Hillslope processes*, P31-53, 1986.
- [28] Meyer, L. D. and W. H. Wischmeier; Mathematical Simulation of the process of soil erosion by water. *Transactions of the ASAE*. vol12, P754-758, 762, 1969.
- [29] Foster, G. R.; Modelling the erosion process. in C. T. Huan, H. P. Jannson, and D. L. Brakensick (ed) *Hydrologic modeling of small watersheds*. AEAS monograph. No. 5, ASAE, St Joseph, MI. 1982.
- [30] AL-Durrach, M. and J. M. Bradford.; New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol45, P949-953, 1981.
- [31] Watson, D. A. and J. M. Laflen; Soil strength, slope and rainfall intensity effects on

- interrill erosion, Transactions of the ASAE, Vol29, No.1, P96-102, 1986.
- [32] Gilley, J.E., D.A Woolhiser, and D.B.Mcwhorter: Interrill Soil erosion-Part I: development of model equation, Transactions of the ASAE, Vol29, P247-253, 159, 1985.
- [33] Foster, G.R., L.F.Huggins and L.D Meyer: A laboratory study of rill hydraulics: I, velocity relationships. II, shear stress relationships, Transactions of the ASAE, Vol37, No.3, P790-796, P797-784, 1984.
- [34] Merritt, E.: The identification of four stages during micro-rill development, Earth Surf. proc. Landf. Vol9, P493-496, 1984.
- [35] Savat, J. and J. De Ploey: Sheetwash and rill development surface flow, in R.B.Eryan and A.Yair (Eds) Badland Geomorphology and Piping, Geobooks Norwich, P113-126, 1982.
- [36] Cai, Q.G., S.H.Luk, H.Chen and Y.Z.Chen: Effect on surface crusting on water erosion, Laboratory experiments on loess soils, China, Proceedings International symposium on the Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting, Chent, Belgium 1985.
- [37] Farres, P.: The role of time and aggregate size in the crusting process, Earth surf. Proc., Vol.3, P243-254, 1978.
- [38] Al-Durrah, M.M., and J.M.Bradford: Parameters for describing soil detachment due to single waterdrop impact, Soil Science society of America Journal, Vol.46, P836-840, 1982.
- [39] Luk, S.H.: Experiments on the relation of soil strength and crust strength to rainwash and rainsplash erosion, at the 5th International Soil Conservation Conference Bangkok, Thailand, January, 1988.
- [40] Kirkby, M.J.: Modelling water erosion processes, In M.J.kirkby and R.P.C.Morgan (Eds) Soil erosion, Wiley Chichester P183-216, 1981.
- [41] Morgan, R.P.C., D.D.V.Morgan and H.J.Finney: A predictive model for the assessment of soil erosion risk, J.Agric. Engng. Res. Vol.30, p245-253, 1984.
- [42] Carson, M.A. and M.J.kirkby: 坡面形态与形成过程, 窦藻璋译, 科学出版社, 1984年.
- [43] Ahnert, F.: Approaches to dynamic equilibrium in theoretical simulations of slope development, Earth Surf. Proc. Landf. Vol12, p3-15, 1987.
- [44] Moore, I.D. and G.J.Burch: Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream theory, 1986.
- [45] 中国科学院地理研究所水文室: 黄土坡耕地水土流失计算方法的探讨, 地理学报, 32 (2), 1966年.
- [46] 周佩华等: 降雨能量的试验研究初报, 水土保持通报, 第1期, 1981年.
- [47] 江忠善等: 黄土地区天然降雨雨滴特性研究, 中国水土保持, 第3期, 1983年.
- [48] 王兴奎、钱宁、胡维德: 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成和汇流过程, 水利学报, 第7期, 1982年.
- [49] 朱显谟: 黄土高原流失侵蚀的主要类型及有关因素, 水土保持通报, 第3、4期, 1981年.
- [50] 黄秉维: 解决华北水源不足, 提高黄土高原与华北平原农业生产和消除黄河水害的一个关键问题及其试验研究, 地理研究与开发, 6 (1), 1987年.
- [51] 刘志, 江忠善: 雨滴打击作用对黄土结皮影响的研究, 水土保持通报, 第1期, 1988年.

- (52) 罗来兴等：黄河中游黄土区域沟道流域侵蚀地貌及其对水土保持关系论从，科学出版社，1958年。
- (53) 陈永宗：黄河中游黄土丘陵地区坡地的侵蚀发育，地理集刊，第10期，科学出版社，1976年。
- (54) 郑粉莉、唐克丽、周佩华：坡耕地细沟侵蚀的发生发展和防治途径的探讨，水土保持学报，1(1)，1987年。
- (55) 承继成、江美球：流域地貌数字模型，科学出版社，1980年。
- (56) Cai.Q.G and S.H.Luk, Effect of slope length on soil loss in the loess plateau region China, at the 5th International Soil Conservation Conference, Bangkok Thailand, January, 1988.

《地理研究》下期要目预告

胡序威：为发展经济地理学而共同奋斗

王广德：离散线性水文系统模型及其参数估计

孙安健：美国山地降水量垂直分布的研究

黄春长：渭河流域全新世黄土与环境变迁

尹绍亭：试论云南民族地理

张凌云：旅游地引力模型研究的回顾与前瞻

于洁静：森林水文研究的初步综述

高 抒：台维斯学术思想的继承与突破

毛政旦：论山地气候带和气候型