

土壤侵蚀与水土保持研究进展*

李占斌^{1,2} 朱冰冰¹ 李 鹏¹

(1 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

(2 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, 陕西杨凌 712100)

摘 要 土壤侵蚀制约着社会、经济、环境的协调发展, 已经成为全球性的主要环境问题之一。本文从雨滴击溅侵蚀、坡面水蚀过程、坡沟系统水沙传递关系和沟道侵蚀输沙等四个过程系统地分析了土壤侵蚀过程研究中取得的进展和存在的不足, 简述了国内外土壤侵蚀预报研究的历史, 总结了植被措施和工程措施对水土流失的调控作用机理和水土保持效益等有关问题, 对土壤侵蚀与水土保持科学今后的研究方向提出见解, 指出了加强对土壤侵蚀过程与机理、大尺度土壤侵蚀预报模型、土壤侵蚀与水土流失治理环境效应评价和水土流失调控技术的科技转化等亟待解决问题的研究深度和广度。

关键词 土壤侵蚀; 水土保持

中图分类号 S157 **文献标识码** A

土壤侵蚀是全球性的主要环境问题之一, 不但导致土壤退化、土地生产力降低, 影响农业生产和食物安全, 而且随径流泥沙运移的污染物质对异地(侵蚀区的相邻地区, 包括位于侵蚀流域的下游地区、湖泊和近海地区)生态、环境、人类生存和社会经济发展带来严重影响, 同时, 土壤侵蚀和泥沙搬运使土壤有机 C、N 的含量、组分产生较大变化, 进而影响全球生源要素 (C、N、P、S) 循环乃至全球气候变化。中国是世界上水土流失最严重的国家之一, 水土流失面广量大^[1]。根据第二次全国土壤侵蚀遥感调查, 我国水蚀和风蚀面积 356.9 万 km², 占国土面积的 37.6%^[2]。无论山区、丘陵区, 风沙区, 还是农村、城市、沿海地区均存在不同程度的水土流失问题^[3]。据统计, 2000 年我国因水土流失而造成的直接经济损失高达 642.6 亿元, 相当于当年全国第一产业 GDP 的 4.0%、总 GDP 的 0.62%^[4]。水土流失已成为中国的头号环境问题, 对社会经济发展和人民群众生产、生活带来严重危害。

1 土壤侵蚀研究进展

尽管世界上许多国家长期受到土壤侵蚀的严重危害, 而真正对土壤侵蚀进行试验研究却始于 1877 年德国土壤学家 Ewald Wollny 的研究。此后

的一个多世纪以来, 在各国学者的努力下, 对土壤侵蚀基本规律认识不断发展。我国土壤侵蚀科学研究始于 20 世纪 20 年代, 50 年代大规模展开并取得重要成果, 70 年代末, 改革开放的实施和深入发展为土壤侵蚀科学研究提供了更为广阔的发展空间。经过 80 多年长期不懈的努力, 我国土壤侵蚀科学研究取得了丰硕的成果, 揭示了土壤侵蚀过程和机理, 初步建立了坡面土壤流失预报模型并正在研究建立以流域为单元的水蚀预报模型方程, 开展了小流域综合治理试验示范研究, 建立了水土保持效益观测研究和评价体系, 强化了水土流失的预防监督和管理机制。近年来随着遥感及“3S 技术、电子计算机技术的飞速发展和普及应用, 同时在土壤侵蚀机理研究和防治理论研究方面引入了现代系统科学计算科学, 如系统论、运筹学、生态经济理论、景观生态学原理等, 大大加快了土壤侵蚀研究步伐, 扩大了研究的深度和广度, 某些理论研究成果已步入世界前沿或达到国际领先水平。

1.1 土壤侵蚀过程研究

1.1.1 雨滴击溅侵蚀 雨滴击溅侵蚀是土壤侵蚀过程的开始。目前溅蚀的研究成果主要集中在击溅侵蚀模拟方面, 学者们将影响溅蚀的因子分为降雨动力与下垫面条件两类, 并建立了降雨特性、土壤特性及地形因子等与溅蚀量的各种经验关系

* 国家重点基础研究发展规划项目 (2007CB407206) 和国家自然科学基金项目 (40371075) 资助

作者简介: 李占斌 (1962 ~), 男, 工学博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究, 发表论文 100 多篇

收稿日期: 2008 - 06 - 22; 收到修改稿日期: 2008 - 07 - 20

式。一般认为,溅蚀量与降雨动能呈指数关系,公式中系数与指数的差异取决于土壤特性的差异和地域的不同^[5-8]。考虑到地面坡度对溅蚀强度的影响,学者们通过不同的试验方法建立了溅蚀强度与坡度因子之间的关系方程^[9,10]。

薄层水流和表土结皮的存在对坡面溅蚀产生很大影响。实验证明,溅蚀量随薄层水流水深的增加而增加,当薄层水流水深增加到雨滴直径时,溅蚀量开始减少。Gilley^[11]提出了雨滴分散量与雨滴直径、雨滴速度及水层深度的关系方程,并且有较好的适用性和较高的预报精度。当地表形成结皮时,溅蚀分散量减少,但由于土壤入渗显著减少,坡面产流量增大,坡面侵蚀量较无结皮时增大数倍至几十倍。也有学者综合考虑了坡度、植被和表土结皮对溅蚀量的影响,提出了溅蚀量方程^[12],但作者未说明模型用于实践的情况以及精确度问题。

雨滴溅蚀机理复杂,是土壤 降雨 根系固结系统相互作用、相互影响的结果,虽然对雨滴溅蚀某些影响因素进行了量化描述,但对溅蚀过程机理的研究成果较少。雨滴击溅的力学过程以及雨滴打击与薄层水流输沙的关系是需要强化的研究领域。

1.1.2 坡面水蚀过程 坡面水蚀包括降雨击溅和径流冲刷引起土壤颗粒分散、剥离、泥沙输移和沉积四个过程,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,是深入认识坡面水土流失过程的必然途径。坡面径流分离土壤过程的水动力学机理的研究,是分析坡面水蚀过程、建立坡面水蚀模型的前提,因此,国内外学者在这方面做了广泛而深入的研究,从侵蚀机理到侵蚀细沟演变规律以及伴随的各水力要素变化特点均取得了大量研究成果。

最早对坡面流的特性进行系统的定量研究始于1945年Horton的研究^[13];随后,学者们纷纷通过试验对坡面流的水力学特性进行了系统的研究^[11,14],分析了坡面流的阻力规律并进行了模拟计算^[15-18],深化了细沟侵蚀发生的临界动力学条件以及水力学特性研究^[19-23],建立了坡面径流侵蚀力计算模型^[24-28]。

国内对坡面流和坡面过程的研究始于对黄土高原水土流失的重视。一大批学者对黄土高原土壤侵蚀类型及分区进行了深入的研究^[29-31],在此基础上,学者们开始全面从土壤侵蚀角度研究坡面流与降雨的关系及坡面流与坡面侵蚀的机制^[32-42],通

过试验从水文学过程深入分析黄土坡面产流与侵蚀的关系^[43-49],随后,对影响坡面流形成及坡面侵蚀的单个因素进行深入探讨^[50-55],得到许多经验方程^[56,57]。

坡面水蚀过程研究经历了上百年的时间,逐步由经验性分析走向动力学特征为主的机理研究,尤其是在动力学研究方面取得了较大的进展,但由于坡面流是一种十分复杂的自然流动,涉及坡面边界及表面条件十分复杂,流动形态千变万化,至今对其在这些复杂条件下的流体力学规律认识仍不完善,有待于从野外观测、试验研究、理论分析,尤其是动力学过程的分析等方面不断深入研究。

1.1.3 坡沟系统水沙关系 坡沟关系是黄土高原的特有问题。长期以来,坡沟侵蚀产沙关系一直是研究的热点。其涉及坡面侵蚀、沟道侵蚀以及坡沟侵蚀输沙与沉积过程的耦合,由于缺乏侵蚀过程定量和坡沟泥沙来源辨识手段,坡沟侵蚀产沙的研究一直停留在定性描述阶段。20世纪50年代以来,学者们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,揭示了坡面侵蚀形式和形态空间垂直分异的基本格局^[58,59],阐明了沟间地与沟谷中沟谷侵蚀发育的异同,为黄土高原沟壑区沟谷侵蚀的理论研究和综合治理提供了依据。80年代以来的很多研究表明,坡面来水来沙使沟坡的侵蚀产沙能力大大增加^[60-63];此后,随着稀土元素(Rare earth element, REE)、⁷Be等示踪技术的应用,许多学者通过试验就黄土高原沟间地与沟谷地的产沙比例的问题进行了探讨^[64,65],在坡面、沟坡和沟道不同的地貌部位建立了相应的侵蚀产沙关系式^[66],初步阐明了坡沟侵蚀的相互关系。国外学者从沟蚀出发,对沟蚀发生的过程和侵蚀产沙特征进行了深入细致的研究,强调了上方来水对沟道侵蚀的影响^[67],并建立了不同的经验模型对沟蚀过程进行描述^[68,69]。

坡沟侵蚀产沙关系的研究取得了不少成果,为从定量和动力学角度研究坡沟关系奠定了基础,然而,由于黄土高原坡沟系统的复杂性和室内外试验条件的限制,侵蚀产沙过程中许多问题仍然不清楚,有待于GIS技术和REE示踪技术的进一步应用和量测设备的完善,深刻认识坡面沟道侵蚀—沉积—搬运过程的时空变化及其动力学过程,进一步揭示坡沟侵蚀产沙机理。

1.1.4 沟道侵蚀与输沙 沟道是一种具有陡坡的遭受间歇性洪水冲刷的集水道,作为输沙通道和

侵蚀主体,其研究对揭示水土流失规律和进行流域产沙模拟有重要意义。沟道侵蚀是由重力和水流冲刷联合作用引起的^[62]。受沟道重力侵蚀试验和量测技术的限制,人们对沟道侵蚀力学机理的研究远远不够,对沟道侵蚀发生的临界水力条件、力学过程等认识不清,仅有的研究集中于沟道侵蚀与坡面侵蚀产沙比例方面。在分析典型小流域坡沟侵蚀关系和产沙机理基础上,学者们从地貌演化的角度探讨沟道系统的发展和演化,确定了沟道侵蚀产沙的比例^[66],用地形特征指示沟道的形成。土壤侵蚀示踪技术的出现和发展,为侵蚀产沙过程的定量和泥沙来源的辨识提供了有效手段,一大批的学者利用不同的示踪元素成功地得到了流域侵蚀泥沙的来源^[70-75]。

1.2 土壤侵蚀预报

土壤侵蚀预报研究是土壤侵蚀学科的前沿领域和土壤侵蚀过程定量研究的有效手段,其研究能够带动土壤侵蚀过程及其机理、土壤侵蚀防治及侵蚀环境效应评价的研究,从而促进水土保持管理工作的科学化和定量化。近30年来,世界各国在集中人力和物力开发侵蚀预报经验模型的同时,注重土壤侵蚀物理过程及其物理模型的研究,取得了大批创新性的研究成果,先后开发了通用土壤流失方程(USLE)和修正的通用土壤流失方程(RUSLE)、水蚀预报模型(WEPPI)、荷兰模型(LISEM)、欧洲水蚀预报模型(EROSSEM)等。

国际上土壤侵蚀预报模型研究以美国为代表,20世纪70年代以前,利用大量小区观测资料和模拟降雨试验资料建立了通用土壤流失方程(USLE)。该模型形式简单,使用方便,但该模型仅适用于平缓坡地,加上该模型缺乏对侵蚀过程及其机理的深入剖析,推广应用受到限制。70年代以后,美国应用现代化的试验测试手段和计算机模拟技术,建立了修正的通用土壤流失方程。在此基础上,从1985年开始,美国农业部投入大量的人力物力进行水蚀预报模型(WEPPI)的研究,该模型是迄今为止描述水蚀相关物理过程参数最多的模型。在完善开发WEPPI模型的同时,美国农业部农业研究局和自然资源保护局共同研究开发了浅沟侵蚀预报模型(EGEM),可用于预报单条浅沟年平均土壤侵蚀量。英国Morgan等根据欧洲土壤侵蚀的研究成果,开发了用于描述和预报田间和流域的土壤侵蚀预报模型(EUROSEM)。荷兰科学家结合本国的实际和研究成果,开发了LISEM土壤侵蚀模型。澳大利亚也

在开发自己的土壤侵蚀预报模型(Rose model)。

我国土壤侵蚀预报模型始于20世纪50年代,在黄土高原地区起步,并以该地区研究为主逐渐发展。早期的模型大都是以坡面土壤流失预报为着眼点,根据径流小区观测资料,建立估算次降雨土壤侵蚀量的统计模型^[31, 76],为近期土壤侵蚀理论模型的构建奠定了理论基础。从70年代起,以美国通用土壤流失预报方程USLE为蓝本,根据各地研究区的实际情况修正参数,建立了若干个地区性的土壤侵蚀预报模型,部分还对输沙量过程进行预报^[77]。80年代中期,以侵蚀产沙物理过程为基础的概念性模型得到了一定的进展,建立了若干个流域侵蚀产沙的模拟模型^[78]。进入20世纪90年代,基于土壤侵蚀过程的研究成果,尝试物理模型的建立。建立基于过程的水蚀预报模型需要具备两个先决条件,一是通过对水蚀过程的深入研究和认识,揭示水蚀过程的动力机制,建立水蚀过程定量表达式,二是对影响水蚀过程的自然因素和人为因子进行系统观测和积累,而我国在这两个方面均存在一定差距,还难以满足水蚀预报研究的实际需要。因此充分考虑我国侵蚀环境的复杂性及研发水蚀预报模型的难度,收集全国不同水蚀类型区土壤侵蚀试验观测、水文泥沙观测和土壤侵蚀研究等方面的数据,建立标准化的国家土壤侵蚀数据库;结合观测资料分析和水蚀过程的研究成果,提出我国水蚀预报模型的基本结构,并对模型参数表述及其标准化进行系统研究将是今后研究的重点。

2 水土流失调控方法

2.1 植被对水土流失的调控作用

很多研究已经表明,植被控制水土流失的作用十分明显和显著。国内外学者针对植被与水土流失的关系进行了大量的研究,但是由于各自从不同的学科领域出发,针对不同的自然社会经济条件,在研究方法、尺度和对象上均有显著的差别。

在欧洲,尤其是英国,土壤侵蚀主要是地貌学家所关注的问题,因此,地貌学家们为了探求生物在地貌发育过程的作用,开创了生物地貌学的研究,强调在地貌发育过程中森林植被变化对侵蚀、搬运、沉积、风化等物理化学过程在景观尺度和时间尺度上的影响,其中以利用植被参数和土地利用参数来模拟流域产沙量最具代表性。在美国,森林生态学家研究了森林采伐与演替对森林生态系统

各种过程与格局变化的影响,以生态系统(流域)为单元,研究森林植被变化对土壤侵蚀以及采伐对河川径流泥沙含量的影响,结果表明,生物量累计过程是控制土壤侵蚀的主要生物学机制^[79]。

我国自然与社会经济条件较为特殊,有关植被对水土流失调控作用的研究相对较深入和广泛,研究区域遍布我国南北,研究的树种基本上涉及了这些区域极具代表性的种群。以试验观测研究为主流。在理论研究方面,从能量角度研究林冠对降雨动能的影响^[80, 81],从力学角度分析林木根系在坡体稳定上的作用来研究林木控制重力侵蚀^[82],从林地地表糙率的研究来分析林地地被物对径流流速的阻延作用^[83],以坡面侵蚀物理过程为出发点,建立描述有林地和无林地的坡面霍顿地表径流侵蚀数学物理模型,评价林木对土壤侵蚀的控制作用^[84]。

为了合理描述植被对水土流失的调控作用,国内外学者从不同的研究角度提出了许多综合性的指标及体系,引申出了潜势盖度、临界盖度、有效盖度的概念^[85];更多的学者分析了植被覆盖度与径流量、土壤流失量之间的定量关系^[86, 87],并建立了植被控制土壤侵蚀的一般方程,对于定量研究植被控制土壤侵蚀的作用具有重大意义。也有一些学者以群落和生态系统的观点综合考察植被的水土保持作用。

植被控制水土流失的效益是明显的,但由于植被生长发育等状况的不同以及人为等因素的不同影响,不同植被的冠层、地表层以及地下根系分布层等出现较大差异,其水土保持效益也就有所不同。从根本上说,植被尤其是草类植被减少水土流失的主要原因在于削减了径流的侵蚀动力,提高了土壤的抗冲性能。因此进一步深入分析植被与根系提高土壤抗冲性之间的关系,建立二者之间的关系模型,对于推动植被覆盖下土壤侵蚀的研究向定量发展具有重要意义。

2.2 工程措施的调控作用

水土保持工程措施是流域水土保持综合治理体系的重要组成部分。朱显谟院士根据全国水土流失调查,提出在黄土高原实行“全部降雨就地拦蓄入渗”、长江流域实行“排水保土”的分区治理措施,形成了目前我国黄土高原淤地坝系建设和长江流域兴修梯田并辅以坡面水系工程的水土保持综合治理的良好局面。

在黄土高原地区,淤地坝是一种行之有效的水土保持工程措施,是水土流失地区小流域治理的最

后一道防线。黄土高原地区几十年的淤地坝建设实践充分证明,坝系建设具有显著的生态、社会和经济效益,在治理水土流失、减少入黄泥沙、发展区域经济、提高群众生活水平和改善生态环境等方面具有不可替代的作用。据统计,经过50多年的建设与发展,黄土高原地区现有淤地坝11万余座,主要分布在陕西、山西、甘肃、内蒙、宁夏、青海和河南等7省区,控制面积1.01万 km^2 ,拦沙210亿 m^3 ,淤成坝地31.3万 hm^2 ,保护川台地1.87万 hm^2 ,初步治理面积13.37万 km^2 ,减沙效益显著。

目前,广大科技工作者在淤地坝减水减沙效益、坝系相对稳定、坝系的布设方式、坝系规划原则、建坝时序、坝系水毁灾害、淤地坝优化布局、建坝前后流域出口泥沙粒径的变化等方面做了大量工作。同时,由于淤地坝泥沙沉积记载着建坝前后几十年的土壤侵蚀环境变化历史,能评价和预测区域土壤侵蚀变化状况,为水土保持与治理提供了基础资料,因此,很多学者通过对坝地沉积泥沙的研究分析,推算流域侵蚀量^[30, 31],并结合示踪技术,得出流域坡面与沟道产沙比例,为定量确定流域泥沙来源提供基础^[68, 75]。

由于黄土丘陵区侵蚀类型复杂、侵蚀过程特殊以及传统研究方法的局限性,对淤地坝建坝后较长时间尺度内,尤其是在淤地坝不同发展阶段,淤地坝泥沙沉积过程、特征及其与坡沟侵蚀产沙间的响应关系,侵蚀泥沙在坝地内的再分布特征及规律,淤地坝泥沙沉积与小流域侵蚀产沙强度的耦合作用关系,建坝后小流域土壤侵蚀特征演化规律等方面的研究甚少,故此,在揭示建坝后土壤侵蚀特征演化规律及淤地坝减蚀作用机理、正确认识和评价淤地坝减蚀作用程度和过程方面仍存在许多不足,还有不少问题急待解决。这些均直接影响到今后淤地坝的建设和治黄措施的选择及制定,对黄土高原治理具有举足轻重的作用。

3 展 望

中国的水土流失形势严峻,水土流失已经成为我国环境危害的第一位问题。然而,由于我国地域辽阔、各地自然与人文环境背景迥异,造成侵蚀特征各异,加之土壤侵蚀影响因素多样,过程复杂,时间和空间上分布的随机性和不确定性,均给土壤侵蚀科学研究带来极大的困难和严峻的挑战。与此同时,现代科学技术的发展,尤其是遥感、GIS三维

激光扫描、几何摄影测量等技术在土壤侵蚀研究中的应用,为土壤侵蚀科学研究的深入开展带来了新的曙光,为土壤侵蚀领域科技创新提供了技术支撑。为了提升我国土壤侵蚀科学研究的水平,推进水土流失治理的进度和质量,在目前的形势下,今后土壤侵蚀与水土保持工作应注重以下几点:

1) 集中研究水蚀和风蚀过程的动力学过程及其机制,建立大尺度水蚀和风蚀预报模型;

2) 建立水土流失和水土保持环境效应评价理论与指标体系,分析和揭示土壤侵蚀与水土保持治理对区域环境的影响;

3) 加大水土流失过程及调控研究,加大科技转化力度等。

参考文献

- [1] 郑粉莉,王占礼,杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望. 自然杂志, 2008, 30(1): 12~16. Zheng F L, Wang Z L, Yang Q K. The retrospection and prospect on soil erosion research in China (In Chinese). Chinese Journal of Nature, 2008, 30(1): 12~16
- [2] 李智广,曹炜,刘秉正,等. 我国水土流失状况与发展趋势研究. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 57~62. Li Z G, Cao W, Liu B Z, *et al*. Current status and developing trend of soil erosion in China (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 57~62
- [3] 刘震. 从我国水土流失现状看水土保持生态建设战略布局及主要任务. 理论探讨, 2002, 7: 31~33. Liu Z. The strategic layout and main tasks of soil and water conservation and ecological construction from the aspect of soil loss status in China (In Chinese). Theoretical Discussion, 2002, 7: 31~33
- [4] 朱高洪,毛锋. 我国水土流失影响辨识与直接经济损失评估. 中国水土保持, 2007(8): 4~7. Zhu G H, Mao F. Recognition of influence of soil and water loss in China and evaluation on direct economic losses (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2007(8): 4~7
- [5] 周佩华,窦葆璋,孙清芳,等. 降雨能量的试验研究初报. 水土保持通报, 1981(1): 51~60. Zhou P H, Dou B Z, Sun Q F, *et al*. A preliminary report on the study of rainfall energy experiment (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1981(1): 51~60
- [6] 周佩华. 黄土侵蚀机理探讨. 水土保持研究, 1997, 4(5): 40~46. Zhou P H. Discussion on mechanism of loess erosion (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 1997, 4(5): 40~46
- [7] 江忠善,刘志. 降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究. 水土保持学报, 1989(2): 29~35. Jiang Z S, Liu Z. Effect of rainfall factors and slope on splash erosion (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1989(2): 29~35
- [8] 蔡强国. 降雨特性对溅蚀影响的初步实验研究. 中国水土保持, 1986(6): 30~35. Cai Q G. A preliminary experimental research of rainfall factors on splash erosion (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1986(6): 30~35
- [9] 吴普特,周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响. 水土保持通报, 1991, 11(3): 8~13. Wu P T, Zhou P H. The effect of land slope upon raindrop splash erosion (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991, 11(3): 8~13
- [10] 张科利,细山田健三. 坡面溅蚀发生过程及其与坡度关系的模拟研究. 地理科学, 1998, 18(6): 561~566. Zhang K L, Hosoyamada K. Splash erosion process and its relation to slope gradient (In Chinese). Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(6): 561~566
- [11] Parsons A J, Abrahams A. ed. Overland Flow. London: UCL Press, 1992. 25~52
- [12] 王贵平,曾伯庆,陆兆熊,等. 晋西黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀及预报研究. 细沟间侵蚀. 中国水土保持, 1992(5): 15~18. Wang G P, Zeng B Q, Lu Z X, *et al*. Soil erosion and its prediction on slope surface in the gullied hilly loess region of western Shanxi Province. Rill erosion (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1992(5): 15~18
- [13] Horton R E. Erosion development of streams and their drainage basins. Bulletin of the Geological Society of America, 1945(56): 275~370
- [14] Emmett W W. Overland flow. In: Kirkby M J. ed. Hillslope Hydrology. New York: John Wiley & Sons, 1978. 145~175
- [15] Shen H W, Li R M. Rainfall effect on sheet flow over smooth surface. Transactions of ASAE, 1973, 99: 771~792
- [16] Foster G R. Modeling the erosion process. In: Haan C T, Johnson H P, Brakensiek D L. eds. Hydrologic Modeling of Small Watershed. American Society of Agricultural Engineers, 1982. 297~360
- [17] Forster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: Shear stress relationships. Transaction of ASAE, 1984, 27: 797~804
- [18] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics. Velocity relationships. Transaction of ASAE, 1984, 27(3): 790~796
- [19] Savat J. The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall. Earth Surface Processes, 1977(2): 125~140
- [20] Meyer L D, Foster G R. Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow. Transaction of ASAE, 1965, 8(4): 689~693
- [21] Nearing M A, Bradford J M. Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils. Soil Sci Soc Am. J., 1985, 49: 547~552
- [22] Nearing M A, Norton L, Bulgakav A, *et al*. Hydraulics and erosion in eroding rills. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865~876
- [23] Nearing M A, Simanton H, Norton D, *et al*. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hill slope. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24: 677~686
- [24] Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation. 2nd Ed. New York: Harlow, 1995. 111~140
- [25] Morgan R P C, Rickson R J. Slope Stabilization and Erosion

- Contro: A Bioengineering Approach London: Chapman & Hall, 1995. 30 ~ 42
- [26] Yang N Y, Harry G W. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall Journal of the Hyd Div., ASCE, 1971, 97 (9): 1 367 ~ 1 386
- [27] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics U S Geological Survey Professional, 1966. 420 ~ 423
- [28] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model Transaction of ASAE, 1993, 36: 65 ~ 72
- [29] 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. 土壤学报, 1953, 2 (3): 148 ~ 166. Xi C F, Cheng Y S, Huang Z L. Soil erosion situation and soil and water conservation measures in Jiuyuan gully of Suide, Shaanxi Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1953, 2 (3): 148 ~ 166
- [30] 罗来兴,祈延年. 陕北无定河、清涧河黄土区域的侵蚀地形与侵蚀量. 地理学报, 1955, 21 (1): 35 ~ 44. Luo L X, Qi Y N. The erosional landform and erosional amounts of the loess region in Wuding River and Qingjian River in Northern Shaanxi (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 1955, 21 (1): 35 ~ 44
- [31] 黄秉维. 陕西黄土区域土壤侵蚀的因素和方式. 科学通报, 1958 (9): 53 ~ 59. Huang B W. The factors and patterns of soil erosion in the loess region in Shaanxi (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1958 (9): 53 ~ 59
- [32] 江忠善,宋文经,李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究. 中国水土保持, 1983 (3): 32 ~ 36. Jiang Z S, Song W J, Li X Y. Study on the natural raindrop characteristics in the loess region (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1983 (3): 32 ~ 36
- [33] 唐克丽主编. 中国水土保持. 北京:科学出版社, 2004. 307 ~ 322. Tang K L. ed. Soil and Water Conservation in China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2004. 307 ~ 322
- [34] 雷阿林,唐克丽. 坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望. 水土保持通报, 1997, 17 (3): 37 ~ 43. Lei A L, Tang K L. Retrospect and prospect for soil erosion studies of ridge-hill-gully slope system (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1997, 17 (3): 37 ~ 43
- [35] 雷阿林,唐克丽. 土壤侵蚀模型试验的原型选定问题. 水土保持学报, 1995, 9 (3): 60 ~ 65. Lei A L, Tang K L. Discussion on choosing prototypes in simulated test of soil erosion (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9 (3): 60 ~ 65
- [36] 陈永宗. 黄土高原土壤侵蚀规律研究工作回顾. 地理研究, 1987, 6 (1): 76 ~ 85. Chen Y Z. A review: The study of soil erosion on Loess Plateau (In Chinese). Geographical Research, 1987, 6 (1): 76 ~ 85
- [37] 景可,陈永宗. 我国土壤侵蚀与地理环境的关系. 地理研究, 1990, 9 (2): 29 ~ 37. Jing K, Chen Y Z. A study of the relations between soil erosion and geographical environment in China (In Chinese). Geographical Research, 1990, 9 (2): 29 ~ 37
- [38] 蔡强国. 流域产沙模型概述. 中国水土保持, 1990 (6): 14 ~ 18. Cai Q G. Review on the modelling of sediment yield from watershed (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1990 (6): 14 ~ 18
- [39] 李占斌,符素华,鲁克新. 秃尾河流域暴雨洪水产沙特性的研究. 水土保持学报, 2001, 15 (2): 88 ~ 91. Li Z B, Fu S H, Lu K X. Characteristics of rainstorm, flood and sediment yield in Tuwei River watershed (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15 (2): 88 ~ 91
- [40] 李占斌,符素华,靳顶. 流域降雨侵蚀产沙过程水沙传递关系研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3 (4): 44 ~ 49. Li Z B, Fu S H, Jin D. Study on transference relationship from runoff discharge to sediment discharge in rainfall erosion sediment yield processes of watershed (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3 (4): 44 ~ 49
- [41] 李占斌,张平仓. 水土流失与江河泥沙灾害及其防治对策. 郑州:黄河水利出版社, 2004. 15 ~ 30. Li Z B, Zhang P C. Soil Loss and River Sediment Disaster and Their Control Strategies (In Chinese). Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2004. 15 ~ 30
- [42] 李占斌. 黄土地区小流域次暴雨侵蚀产沙研究. 西安理工大学学报, 1996, 12 (3): 177 ~ 183. Li Z B. Study on small watershed single storm erosion sediment yield in loess region (In Chinese). Journal of Xi'an University of Technology, 1996, 12 (3): 177 ~ 183
- [43] 郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长和坡度. 中国水土保持, 1989 (8): 23 ~ 24. Zheng F L. The critical slope length and gradient for rill erosion (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1989 (8): 23 ~ 24
- [44] 郑粉莉,唐克丽,周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究. 土壤学报, 1989, 26 (2): 109 ~ 116. Zheng F L, Tang K L, Zhou P H. Study on factors affecting rill erosion on cultivated slope land (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1989, 26 (2): 109 ~ 116
- [45] 郑粉莉. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀与产沙关系及其机理. 地理学报, 1998, 53 (5): 422 ~ 427. Zheng F L. Erosion and sediment yield in different zones of loess slopes (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 1998, 53 (5): 422 ~ 427
- [46] 吴普特,周佩华. 坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究. 水土保持学报, 1992, 6 (1): 16 ~ 24. Wu P T, Zhou P H. Research on the laminar flow type and erosion transportation manners on the slope surface (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6 (1): 16 ~ 24
- [47] 吴普特,周佩华. 雨滴击溅对薄层水流水力摩阻系数的影响. 水土保持学报, 1994, 8 (2): 39 ~ 42. Wu P T, Zhou P H. The effects of raindrop splash on the sheet flow hydraulic friction factor (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8 (2): 39 ~ 42
- [48] 吴普特. 动力水蚀实验研究. 西安:陕西科学技术出版社, 1997. 18 ~ 30. Wu P T. Experimental study on hydrodynamic erosion (In Chinese). Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. 18 ~ 30
- [49] 姚文艺. 坡面流流速计算的研究. 中国水土保持, 1993 (3): 21 ~ 25. Yao W Y. A study on the calculation of the velocity of overland flow (In Chinese). Soil and Water Conservation in

- China, 1993 (3): 21 ~ 25
- [50] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究. 泥沙研究, 1996 (3): 74 ~ 82. Yao W Y. Experiment study on hydraulic resistance laws of overland sheet flow (In Chinese). Journal of Sediment Research, 1996 (3): 74 ~ 82
- [51] 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 63 ~ 67. Yao W Y, Tang L Q. Sediment yield process and model of hydra-erosion (In Chinese). Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2001. 63 ~ 67
- [52] 张科利, 钟德钰. 黄土坡面沟蚀发生机理的水动力学试验研究. 泥沙研究, 1998 (3): 74 ~ 80. Zhang K L, Zhong D Y. Hydraulically experimental study on the reason for gully erosion on the loess slopes (In Chinese). Journal of Sediment Research, 1998 (3): 74 ~ 80
- [53] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展. 地理研究, 2001, 20 (3): 275 ~ 281. Zhang G H. Development of soil erosion models in China (In Chinese). Geographical Research, 2001, 20 (3): 275 ~ 281
- [54] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究. 水科学进展, 2002, 13 (2): 159 ~ 165. Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow (In Chinese). Advances in Water Science, 2002, 13 (2): 159 ~ 165
- [55] 雷廷武, 邵明安, 李占斌, 等. 土壤侵蚀预报模型及其在中国发展的考虑. 水土保持研究, 1999, 6 (2): 162 ~ 164. Lei T W, Shao M A, Li Z B, *et al*. Soil erosion predict models and the strategic considerations for their development in china (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6 (2): 162 ~ 164
- [56] 雷廷武, 张晴雯, 赵军. 细沟水蚀动态过程的稳定性稀土元素示踪研究. 水利学报, 2004, 12: 84 ~ 91. Lei T W, Zhang Q W, Zhao J. Study on dynamic tracing of rill erosion process with rare earth element tracer (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 12: 84 ~ 91
- [57] 承继成. 坡地流水作用的分带性. 中国地理学会 1963 年论文集. 北京: 科学出版社, 1965. 99 ~ 104. Cheng J C. Zonality of slope fluviation (In Chinese). Thesis of the Geographical Society of China in 1963. Beijing: Science Press, 1965. 99 ~ 104
- [58] 刘宝元, 朱显谟. 黄土高原土壤侵蚀垂直分带性研究. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988 (7): 5 ~ 8. Liu B Y, Zhu X M. Soil erosion developed with the vertical belts on the Loess Plateau (In Chinese). Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, 1988 (7): 5 ~ 8
- [59] 焦菊英. 小流域沟间地、沟谷地径流泥沙来量的探讨. 水土保持学报, 1992, 6 (2): 24 ~ 28. Jiao J Y. Discussion on the sediment amount by runoff from hilly and gully land in a watershed (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6 (2): 24 ~ 28
- [60] 陈浩, 王开章. 黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究. 地理研究, 1999, 18 (4): 363 ~ 372. Chen H, Wang K Z. A study on the slope-gully erosion relationship on small basins in the loess areas at the middle reaches of the Yellow River (In Chinese). Geographical Research, 1999, 18 (4): 363 ~ 372
- [61] 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系. 地理学报, 2000, 55 (3): 354 ~ 363. Chen H. Relationship between erosion and sediment yield in drainage basins of loess hilly areas (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (3): 354 ~ 363
- [62] 陈浩. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究. 北京: 气象出版社, 1993. 134 ~ 173. Chen H. Study on sediment yield from slope land and gully of a watershed (In Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 134 ~ 173
- [63] 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. 泥沙研究, 1991 (4): 39 ~ 45. Zhang K L. A study on the distribution of erosion and sediment yield on loess slope and the relationship between the distribution and rain characteristics (In Chinese). Journal of Sediment Research, 1991 (4): 39 ~ 45
- [64] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗, 等. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟. 北京: 科学出版社, 1998. 135 ~ 147. Cai Q G, Wang G P, Chen Y Z, *et al*. Process of sediment yield in a small watershed of the Loess Plateau and its modelling (In Chinese). Beijing: Science Press, 1998. 135 ~ 147
- [65] 蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型. 地理学报, 1996, 51 (2): 108 ~ 117. Cai Q G, Lu Z X, Wang G P. Process-based soil erosion and sediment yield model in a small basin in the hilly loess region (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 1996, 51 (2): 108 ~ 117
- [66] Hessel R, van Asch T. Modeling gully erosion for a small catchment on the Chinese Loess Plateau. Catena, 2003, 54: 131 ~ 146
- [67] Torri D, Borselli L. Equation for high-rate gully erosion. Catena, 2003, 50: 449 ~ 467
- [68] Harvey A. M. Coupling between hill slopes and channels in upland fluvial systems: Implications for landscape sensitivity, illustrated from the Howgill Fells, northwest England. Catena, 2001, 42: 225 ~ 250
- [69] 胡刚, 伍永秋. 发生沟蚀 (切沟) 的地貌临界研究综述. 山地学报, 2005, 23 (5): 565 ~ 570. Hu G, Wu Y Q. Progress in the study of geomorphic threshold theory in channel (gully) erosion (In Chinese). Journal of Mountain Research, 2005, 23 (5): 565 ~ 570
- [70] Zhang X C, Friedrich J M, Nearing M A, *et al*. Potential use of rare earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies. Soil Sci Soc Am. J., 2001, 65: 1505 ~ 1509
- [71] Tian J L, Zhou P H, Liu P L. REE tracer method for studies on soil erosion. Intem. J. Sediment Research, 1994, 9 (2): 36 ~ 38
- [72] Ventura E J, Nearing M A, Norton L D. Developing a magnetic tracer to study soil erosion. Catena, 2001, 43 (4): 275 ~ 278
- [73] 张信宝. 黄土高原小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 法研究. 科学通报, 1989 (3): 210 ~ 213. Zhang X B. Study on sedimentation source in a small catchment using caesium-137 for the Loess Plateau (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1989 (3): 210 ~ 213
- [74] 杨明义, 田均良, 刘普灵. 应用 ^{137}Cs 研究小流域泥沙来源. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5 (3): 49 ~ 53. Yang M Y, Tian J L, Liu P L. Studying sediment sources in small watershed

- using ^{137}Cs tracing (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5 (3): 49 ~ 53
- [75] 刘善建. 天水水土流失测验的初步分析. 科学通报, 1953 (12): 59 ~ 65. Liu S J. Preliminary analysis of soil loss experiment in Tianshui (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1953 (12): 59 ~ 65
- [76] 牟金泽. 雨滴速度计算公式. 中国水土保持, 1983 (3): 25 ~ 30. Mou J Z. The calculating formula of raindrop velocity (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1983 (3): 25 ~ 30
- [77] 汤立群, 陈国祥. 小流域产流产沙动力学模型. 水动力学研究与进展 A辑, 1997, 12 (2): 164 ~ 174. Tang L Q, Chen G X. A dynamic model of runoff and sediment yield from small watershed (In Chinese). Journal of Hydrodynamics, 1997, 12 (2): 164 ~ 174
- [78] Bomann F H, Likens G E. Pattern and processes in a forested ecosystem. New York: Springer-Verlag, 1979
- [79] 余新晓. 森林植被减弱降雨侵蚀能量的数理分析(). 水土保持学报, 1987 (2): 24 ~ 30. Yu X X. Mathematical analysis of forest vegetation on reducing soil erosional energy() (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1987 (2): 24 ~ 30
- [80] 余新晓. 森林植被减弱降雨侵蚀能量的数理分析(). 水土保持学报, 1987 (3): 90 ~ 96. Yu X X. Mathematical analysis of forest vegetation on reducing soil erosional energy() (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1987 (3): 90 ~ 96
- [81] 王进鑫, 王海迪, 刘广全. 刺槐和侧柏人工林有效根系密度分布规律研究. 西北植物学报, 2004, 24 (12): 2 208 ~ 2 214. Wang J X, Wang H D, Liu G Q. Distribution characteristics of effective root density in the planted Robinia pseudoacacia and Platycladus orientalis forest site (In Chinese). Acta Botanica Bo-
- reali-Occidentalia Sinica, 2004, 24 (12): 2 208 ~ 2 214
- [82] 张洪江. 晋西不同林地状况对糙率系数 n 值影响的研究. 水土保持通报, 1995, 15 (2): 10 ~ 21. Zhang H J. A study on effect of forest land condition upon roughness coefficient in the west of Shanxi Province (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15 (2): 10 ~ 21
- [83] 吴钦孝. 森林保持水土机理及功能调控技术. 北京: 科学出版社, 2005. 45 ~ 60. Wu Q X. Mechanism of forest on soil and water conservation and controlling techniques on their function (In Chinese). Beijing: Science Press, 2005. 45 ~ 60
- [84] 郭忠升. 水土保持植被建设中的三个盖度: 潜势盖度、临界盖度和有效盖度. 中国水土保持, 2000 (4): 30 ~ 31. Guo Z S. Three coverage rates in the vegetation construction of soil and water conservation: potential rates, critical rate and efficiency rates (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2000 (4): 30 ~ 31
- [85] 张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述. 水土保持研究, 1996, 3 (2): 104 ~ 110. Zhang G H, Liang Y M. A summary of impact of vegetation coverage on soil and water conservation benefit (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 1996, 3 (2): 104 ~ 110
- [86] 张光辉, 梁一民. 模拟降雨条件下人工草地产流产沙过程研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2 (3): 56 ~ 59. Zhang G H, Liang Y M. Study on process of runoff and sediment yield in artificial grassland on simulated rainfall condition (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1996, 2 (3): 56 ~ 59
- [87] 王秋生. 植被控制土壤侵蚀的数学模型及其应用. 水土保持学报, 1991 (4): 68 ~ 72. Wang Q S. Mathematical model for controlling soil erosion by vegetation and its application (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1991 (4): 68 ~ 72

ADVANCEMENT IN STUDY ON SOIL EROSION AND SOIL AND WATER CONSERVATION

Li Zhanbin^{1,2} Zhu Bingbing¹ Li Peng¹

(1 Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS, MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Limiting harmonious development of the society, economy and environment, soil erosion has become one of the major environmental problems over the world. Systematic analysis was done of progresses and shortcomings in the study on soil erosion process from the aspects of raindrop splash, process of slope water erosion, transference relationships from runoff discharge to sediment discharge in the slope-gully system and sediment delivery of gully erosion. A brief sketch was present of the history of the study on prediction of soil erosion. And a summary was made of mechanisms of vegetation and engineering measures regulating soil erosion and their effect on soil-water conservation. Besides, suggestions for future researches on soil erosion and soil-water conservation were put forward to, stating that it is essential to intensify the study in width and depth on such problems that urgently need to be solved, as process and mechanism of soil erosion, model for forecasting soil erosion on a larger scope, evaluation of environmental effect of the management of soil erosion and soil-water loss, sci-tech transformation of the techniques for regulating soil-water loss, etc. .

Key words Soil erosion; Soil and water conservation