

土壤溅蚀过程和研究方法综述

罗亲普^{1,2}, 刘文杰^{1*}

(1.中国科学院 西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要 土壤溅蚀是土壤侵蚀过程的开始,是指由于降雨雨滴打击土壤表层,引起土壤颗粒分散和迁移的一种侵蚀过程,是导致坡面水蚀的一个重要威胁因子。因此,土壤溅蚀是土壤侵蚀的重要形式和组成部分,具有重要的研究意义。土壤溅蚀过程和研究方法是土壤溅蚀领域研究的核心内容。论文根据有关资料,综述了国内外土壤溅蚀过程和研究方法方面的主要成果,并对将来的研究方向进行了展望,以期推动我国在该领域的研究工作。国内外研究表明,土壤溅蚀是土壤侵蚀的主要过程之一,是各种水文过程、水力过程和生态过程的综合表现,是复杂的降雨因子和土壤因子共同作用的结果,涉及一系列关于降雨雨滴与地表间的能量转换过程。测量土壤溅蚀的方法主要有溅蚀杯、溅蚀板和溅蚀盘。进一步的研究应致力于土壤溅蚀的力学过程和森林土壤溅蚀过程方面的探讨。

关 键 词 土壤侵蚀;土壤溅蚀过程;研究方法;模型;研究进展

中图分类号 S157.1 文献标识码:A 文章编号 0564-3945(2011)01-0230-06

土壤侵蚀是当前主要的全球性环境与生态问题,是现代土壤学、水文科学和生态学研究的重要内容之一。土壤溅蚀(Soil splash erosion)是土壤侵蚀的重要形式和组成部分,是指由于降雨雨滴打击土壤表层,导致土壤颗粒分散和迁移的一种侵蚀过程,是土壤侵蚀过程的前期阶段和关键环节,是影响坡面水蚀的一个重要威胁因素^[1-5]。世界土壤侵蚀学领域得到广泛应用的著名土壤侵蚀模型 Morgan-Morgan-Finney (MMF)^[6]、EUROSEM^[7]、Water Erosion Prediction Project (WEPP)^[8]均把由于降雨雨滴打击土壤表层引起的土壤溅蚀整合到模型中,土壤溅蚀是构成模型的重要部分之一。因此,在土壤侵蚀领域中,土壤溅蚀具有特殊重要的学术和研究意义。

上世纪 40 年代,国外学者开始土壤溅蚀领域的初步探索,其中美国土壤侵蚀学家 Ellison 的研究工作^[4,5,9]起到较大的指导性作用,该研究者首次提出土壤溅蚀是土壤侵蚀的主要过程之一;并最初将溅蚀杯(Splash cup)应用到土壤溅蚀的定量研究中,为今后土壤溅蚀过程及研究方法的发展奠定良好的科学基础,具有深远的学术意义。70 年代后,高速摄影技术的广泛应用为探明土壤溅蚀的过程机理提供了有力的工具,测量方法及设备的改进也将土壤溅蚀的定量研究推向一个新的发展阶段;同时少数学者初步阐明了森林土壤溅蚀的过程。90 年代后,对土壤溅蚀过程及其机制的描述和分析逐步增多,为建立基于过程的土壤溅蚀预报模型奠定了一定的理论基础。另一方面,指数分布理论

的提出为进一步完善和发展土壤溅蚀的测量方法及设备提供了极其有价值的参考。整体而言,迄今为止国内外关于土壤溅蚀过程和研究方法方面已取得不少成效,但在土壤溅蚀力学过程和森林土壤溅蚀过程方面仍较缺乏清晰明了的认识和理解,对其进一步的深入研究非常必要。论文根据有关资料,综述了国内外土壤溅蚀过程和研究方法方面的主要成果,并对将来的研究方向进行了展望,以期推动我国在该领域的研究工作。

1 土壤溅蚀的过程

土壤溅蚀(溅蚀)是指由于降雨雨滴打击土壤表层,引起土壤颗粒分散和迁移的一种侵蚀过程^[1-3]。土壤溅蚀主要发生在坡面产流之前和产流之初^[10],是在降雨—土壤—径流系统之中的作用过程^[11],并受到降雨特性、植被以及地表状况等众多综合因素的交互作用和影响^[12-14]。土壤溅蚀是土壤侵蚀过程的前期阶段,是土壤侵蚀的重要组成部分^[1-3]。因此,土壤溅蚀过程及其机制的研究对于深层次理解土壤侵蚀链及其动态变化有重要意义。土壤溅蚀过程及其机制是土壤溅蚀领域研究的重要内容之一。高速摄影技术是研究土壤溅蚀过程及其机制的主要手段,它能测量雨滴冲击土壤表层的溅射角度。

20 世纪 40 年代, Ellison 的研究^[4,5,9]将土壤侵蚀分为 4 个基本过程:降雨冲击引起的溅蚀,降雨飞溅引起的溅蚀,地表径流引起的侵蚀,及径流迁移引起的侵蚀;并最早通过试验揭示出溅蚀是土壤侵蚀的主要过

收稿日期 2010-11-16;修订日期 2011-01-05

基金项目 国家自然科学基金(31170447 和 30770368)

作者简介 罗亲普(1986-),男,海南省乐东县人,硕士研究生,主要从事森林生态水文研究。E-mail: lqp1999@yahoo.com.cn

程之一,是导致土壤颗粒分离的重要因子,是土壤侵蚀的重要组成部分,标志着土壤溅蚀过程及其机制研究的开始。1951年Mihara^[15]第一个将高速摄影技术运用到雨滴溅蚀过程的研究中来。其后,Al-Durrah^[16]也利用该技术在不同的土壤表层属性下解析了土壤溅蚀过程发生的机制。

在前人研究的基础上,Terry^[17]提出的关于土壤溅蚀过程的观点和研究结果更得到土壤溅蚀研究领域的普遍认可,该研究者认为,由于降落雨滴的打击作用而导致土壤颗粒被分散和迁移的概念看似简单,但雨滴溅蚀过程实质上是一种复杂的水文地貌过程,包括了一系列溅蚀子过程或‘机制’。对此,该研究者以‘溅蚀组分分析’的形式对前人过去在雨滴溅蚀领域研究中的论文进行了综合评述,并结合室内试验研究,界定了5种主要的溅蚀子过程,它们分别是:团聚体崩解(Aggregate breakdown):土壤团粒或团聚体的破坏;溅蚀坑形成(Cratering):土表微尺度变形和剪切形成坑洼;击溅(Splashing)原始雨滴的子雨滴中土壤颗粒的溅起和夹带;击溅跃迁位移(Splash saltation):子雨滴中未被夹带土壤颗粒的溅起;飞溅蠕动(Splash creep):未被跃移侧向土壤颗粒或团聚体的位移。每一个子过程由许多因素的相互作用来制约。前2种过程由于其主要的作用是分散土壤表面的颗粒,可称为溅蚀分散机制,而后3种过程的主要作用是搬运了受到雨滴打击作用的点的分散土粒,可称为溅蚀迁移机制。5种主要的溅蚀子过程是在单雨滴条件下来界定的,主要是因为单雨滴比复合雨滴(Multiple raindrops)更为适宜研究雨滴溅蚀过程。复合雨滴因其‘降雨增强’(Rainfall enhancement)过程—包括土壤表层压实、结皮及薄层径流对土壤颗粒的悬浮—会导致土壤表层产生一系列附加效应,但这些附加效应严格意义上不是溅蚀本质的直接结果。

值得提出的是,Terry的界定结果^[17]是否完全符合自然降雨背景下发生的土壤溅蚀过程。与室内模拟试验所采用的单雨滴相比,自然降雨的雨滴直径大小分布更为复杂和多样化。因此,在这样的雨滴打击下引起的土壤溅蚀过程可能有别于Terry关于土壤溅蚀过程的部分观点和结论^[17]。对于此问题,今后需进一步的探讨,可侧重在模拟自然降雨的条件下采用高速摄影技术来进行研究,对于揭示土壤溅蚀的过程及其机制、各种不同的土壤侵蚀形式间的过程联系等方面具有重要意义。

在国内方面,许多学者关于土壤溅蚀过程的研究也取得一定成果。郭耀文^[18]将土壤溅蚀过程分为三个阶段:1)干土溅散阶段:降雨初期,雨滴降落到相对较

干燥的土表,因土壤颗粒间隙有空气充填,土粒还来不及吸取雨水,细小土粒只随雨滴溅散开,但仍保持原来的结构;2)泥浆溅散阶段:随降雨时间延长,表层土壤空隙充填的水分逐渐增多,并继续受雨滴的冲击、震荡,引起土壤结构破坏。当其土壤表层水分增加到过于饱和状态后,土壤即成为稀泥状态,泥浆受雨滴冲击,以稀泥状态溅散;3)层状侵蚀阶段:随降雨过程继续延长,土表的泥浆将阻塞土壤孔隙,妨碍水分继续下渗,形成泥浆状的地表浑浊径流,造成地表土粒均匀地流失。

吴普特等^[19]对土壤溅蚀的物理过程做出了较清晰的解释,即地表未产生径流时,具有动能的雨滴打击地表,一部分能量被土壤颗粒吸收,转化为热能。而未被吸收的“过剩”能量破坏了土壤结构,甚至转化为土粒势能,使一部分土粒跃移。由于重力的作用,这些被溅起的土粒重新落到地表,成为“孤立”的土粒。随着雨滴的不断打击,这种溅起土粒的过程不断进行,进而为径流提供更多的沙源。当地表产生径流后,雨滴直接作用的对象则由土壤转变为“水层”。即雨滴首先与水层发生碰撞,一部分能量被水层吸收发热,而“剩余”的能量再次与土壤碰撞,该剩余的能量一部分被土壤颗粒吸收,另一部分则用于破坏土壤结构。但此时这种“二次剩余”能量较小,产生的溅蚀就较小。戚隆溪等^[20]从力学角度出发,认为雨滴溅蚀过程的发生本质是水滴的打击力。雨滴降落到潮湿表层土壤时会形成一个击溅隆起。每个击溅隆起由若干个土壤颗粒组成,外面包裹着水膜,在横向以抛物线形式运动。

整体而言,土壤溅蚀过程表现出较高复杂性的特征,是各种水文过程、水力过程和生态过程的综合表现,是复杂的降雨因子和土壤因子共同作用的结果,涉及到一系列关于降雨雨滴与地表间的能量转换过程。这就决定了土壤溅蚀过程是一个由多要素、多变量构成的、极其复杂的系统。正如国内学者^[21]所指出的那样,土壤溅蚀过程除了受到降雨因素的影响之外,还要取决于土壤表面(包括土壤含水量、产流后的水层深度、土壤结皮形成、地表坡度)发生的一系列物理变化,是一个非常复杂的动力迁移过程。需强调的是,目前关于雨滴打击力与土壤力学特性相互关系的研究仍较薄弱^[10,21]。因此,今后国内的工作应重视土壤溅蚀过程发生的力学过程机理方面的研究,为进一步探明坡面土壤侵蚀形式演化过程及其机制提供必要的理论基础。

2 土壤溅蚀的研究方法

2.1 测量方法

为了获取土壤溅蚀过程足够的资料、可靠的原始

数据以及科学评价溅蚀强度,传统的研究方法是借助相关实验设备,在野外、室内、天然降雨、模拟降雨的条件下,采用直接、定量方法进行土壤溅蚀的测定。在早期研究方法中,Ellison^[5]、Sreenivas 等^[22]以及 Morgan^[1]等就对溅蚀分离和迁移土壤颗粒的测量,之后许多学者均进行了该方面的测定研究。在测定的实验设备方面,Ellison^[5,9]首次将溅蚀杯(Splash cup)应用到雨滴溅蚀的定量研究,随后的土壤溅蚀方面研究中溅蚀杯方法也广泛被许多地区的研究者^[23,24,25]使用,并对其进行了许多改进。除了溅蚀杯(Ellison 型和 Morgan 型)之外^[1,5],测定土壤溅蚀的所广泛采用的实验设备还有溅蚀板(Splash boards)^[9,26]和溅蚀盘(Splash trays)^[27,28]。

然而,在实际测量中各类型的土壤溅蚀实验设备在获得溅蚀率的准确性方面却存在一定差异,许多研究者就此进行了探讨。Sreenivas 等^[22]利用嵌入到土壤表层的溅蚀杯来收集被溅蚀的土壤颗粒。他们提出源自于半径为 R (m) 的溅蚀杯收集的土壤物质重量(g)除以该溅蚀杯的表面积(m^2)作为周围土壤分离和迁移率的指标(即土壤溅蚀率)。这里用 M_r 表示土壤溅蚀率。至今,许多研究仍使用这种方法来测定土壤溅蚀。但是,不少研究者却质疑了该方法及其测定结果的准确性,同时也出现了对相关土壤溅蚀实验设备进行探讨的工作。Van Dijk 等^[2]和 Gumiere 等^[29]均认为土壤溅蚀率(M_r)受到溅蚀杯半径大小的制约,溅蚀杯半径大小对于所测定出的土壤溅蚀率有很大的影响。Torri 等^[30]和 Poesen 等^[31]也认为在溅蚀的测定中,应考虑溅蚀杯的几何参数对溅蚀分离和迁移量测定所产生的影响,并建议使用以下的关系式来消除和修正溅蚀杯半径大小上差异的影响。该关系式为:

$$M_{sr} = M_r \cdot e^{-0.054D}$$

式中: M_{sr} 为真实的单位面积溅蚀土壤物质重量($g\ cm^{-2}$), D 为溅蚀杯直径 (cm), M_r 为表观的试验得出的溅蚀率。Mosley^[13]的研究中也认为,当溅蚀杯的面积小时,测定出的溅蚀率会变大,其原因是在溅蚀杯内,存在更少的溅蚀物质的再沉积。Fernández- Raga 等^[32]完成的研究工作对现有两种不同的测定溅蚀设备(杯模型和漏斗模型)的适用性进行评价,得出了由两种设备得出的溅蚀数据显示出很强的一致性,对于溅蚀的时间格局也可以保持一致,但正如所预料的那样,存在漏斗模型比杯模型得到较高评价的倾向。国内的陈一兵^[33]指出,当前测定土壤溅蚀的方法有多种,但不同的研究者使用的供试面积、雨强、土壤、坡度和降雨时间等条件有所差异,所以结果很难具有可比性,并通过在相同的条件下采用人工降雨装置的实验研究,对比分析 5

种测定溅蚀的方法,得出了结论:1)不同的测定方法其单位溅蚀量差异显著;2)不同的测定方法对溅蚀量与降雨历时的关系影响显著。

近期, Van Dijk 等^[2]指出以往的研究在土壤溅蚀测定中存在实验偏差,并对溅蚀测定方面的问题做了较好总结,必须考虑到源自于溅蚀杯、溅蚀盘或溅蚀板实验的溅蚀分离率是不精确的,并不能应用到野外尺度,除非加以考虑实验设备的几何特性和某一点源的溅蚀土壤颗粒的空间分布。为了解释测定中的存在问题,该研究者提出了具有重要意义的指数分布理论(Exponential Distribution Theory)。指数分布理论基于这样的假设:降落雨滴打击某一点的溅蚀土壤颗粒的空间分布可以被描述为一个指数衰减函数,称为基本溅蚀分布函数(FSDF, fundamental splash distribution function),即:

$$M_r = [1 - \exp(-\frac{\pi}{2} \frac{R}{\Lambda}) \frac{2}{\pi} \frac{\Lambda}{R} \mu]$$

式中: M_r 为表观溅蚀率 ($g\ m^{-2}$)——源自于半径为 R (m) 的溅蚀杯收集的土壤物质重量(g)除以该溅蚀杯的表面积(m^2); Λ 为平均溅蚀距离(m); R 为溅蚀杯半径(m); μ 为真实溅蚀率($g\ m^{-2}$)。指数分布理论能估价实验设备几何特性和溅蚀距离在不同类型溅蚀实验的影响,是阐述土壤溅蚀测定中的溅蚀杯面积效应的重要理论。根据这样的理论及其在试验上的应用, Van Dijk 等^[2]得出了重要的观点,传统的溅蚀测量与真实的溅蚀分离率出现明显分离趋势,两者之间存在差异,但在平均溅蚀距离已知的情况下,这样的分离可以联系起来。同时也强调,溅蚀分离和迁移的测量应考虑溅蚀土壤颗粒的空间分布。但原理上指数分布理论只能解释水平地表的溅蚀测量情况,对于陡坡坡面已不尽适用,其原因在于陡坡坡面上溅蚀土壤颗粒的空间分布表现出了非对称性。Van Dijk 等^[2]进一步的深入研究表明土壤溅蚀的一维测量(例如上坡、下坡和测坡)仍可利用指数分布理论进行解释,但随坡度的增大,该理论解释溅蚀测定所涉及的不确定性程度也增加。需指出的是,尽管指数分布理论较难解释陡坡情况下的土壤溅蚀测定,但为科学阐述测定方法中的偏差提供了较好的理论基础,对于土壤溅蚀的测定方法有着重要的促进作用。

2.2 测量尺度

尺度的科学问题已成为土壤侵蚀中的一个重要概念以及难点和热点研究领域之一。不同的土壤侵蚀过程具有不同的时间和空间尺度,因此所采取的研究和方法技术也并不相同。但是,较早期关于土壤溅蚀的研

究较多忽视了尺度问题。近期,Stroosnijder^[34]对土壤侵蚀测量方法进行了综述,特别阐明了土壤侵蚀的测定必须适宜于其时空尺度的观点,就土壤溅蚀而言,测量的空间尺度是 1 m² 的点,重量变化法是最适宜于点尺度的测量方法。

3.3 模型预测

除了直接利用实验设备的测定方法外,土壤溅蚀可通过模型的间接方法来进行研究。土壤溅蚀模型是土壤侵蚀模型的重要组成部分。利用模型来模拟土壤溅蚀是评价土壤溅蚀强度和速率的重要途径之一。国内外研究者围绕影响土壤溅蚀的各项因素已开展了一系列关于土壤溅蚀的定量分析,并提出了一些具有代表性土壤溅蚀量的经验模型。但目前仍缺乏根据数学物理方程建立描述土壤溅蚀的物理机制较明确的理论模型,一定程度限制建立土壤侵蚀理论性模型的研究进展。

Sharma 等^[35,36]认为对土壤侵蚀发生,雨滴打击土壤表层时雨滴动能必须超过某一临界值。考虑到这一点,并结合了不同单雨滴动能条件下的土壤分离试验研究,提出计算溅蚀量的线性雨滴—分离模型:

$$D = K_d[KE - KE_0]$$

式中 D 为土壤溅蚀分离量 (mg); K_d 为土壤可蚀率系数 (mg mJ⁻¹); KE 和 KE_0 分别为雨滴动能和临界动能 (mJ)。

Nearing 等^[37]通过不同土壤的试验研究得出溅蚀量与动能、切变强度之间呈线性关系,提出以下计算溅蚀量的线性回归方程关系式:

$$D = b + a \frac{E}{r}$$

式中 D 为单雨滴溅蚀量 (mg); E 为雨滴动能 (J); r 为土壤的切变强度 (kPa); a 、 b 为经验系数。

吴普特等^[39]等考虑了影响溅蚀的降雨和坡度因子,并结合实验数据,提出了雨滴溅蚀总量的预报模型:

$$S_T = 5.985(EI)^{0.544} S^{0.471}$$

式中 S_T 为单位面积上的溅蚀总量 (g); E 为雨滴动能 (J m⁻²); I 为降雨强度 (mm min⁻¹); S 为地表坡度 (°)。

国内其他研究者也建立了类似的估算溅蚀量的经验模型。但所得出的模型有一定差异,郑粉莉等^[40]、杨明义等^[38]认为是由于土壤特性的差异和地域的不同所导致的。因此,利用各种土壤溅蚀模型应注意地理区域的分异性特征,需在建立模型参数与区域特征的定量关系基础上才能应用到自己的研究中。

3 存在的问题

近 70 年来,国内外学者较系统地研究了土壤溅蚀

的过程及其机制,丰富和发展土壤溅蚀的研究方法,为土壤溅蚀领域研究提供了有效的参考。然而,由于土壤溅蚀过程是发生在降雨—土壤—径流的系统^[41],是各种水文过程、水力过程和生态过程共同作用的结果,而森林土壤溅蚀又包含森林植被(林冠、枯落物层)的重要因子,从而增加了土壤溅蚀过程的复杂和多样化,给该领域研究带来极大的困难。目前在土壤溅蚀的过程及研究方法方面仍存在许多亟待解决的问题,主要表现在以下 2 方面。

3.1 土壤溅蚀的力学过程

纵观各时期研究成果,土壤溅蚀领域的研究成果主要体现在影响溅蚀量的主要因素及其关系模型方面。而对土壤溅蚀力学过程却缺乏深入的分析。当雨滴打击土壤表面及地表形成薄层径流时都将引起土壤表面条件的改变。受土壤表面条件的影响,土壤溅蚀的力学过程及其机制也有所差异,而目前关于这方面的研究较少^[40],很大程度分散了许多学者的注意力。近年来,国内已有不少研究^[10,21,38,39]指出,土壤溅蚀的力学过程机理以及雨滴打击与薄层水流输沙的关系是当前土壤溅蚀研究中存在的不足和今后需强化的领域。

3.2 森林土壤溅蚀过程

长期以来,国内外土壤溅蚀的研究过于关注农业用地,一定程度忽略了发生在森林表层土壤的溅蚀过程。目前,国内已有不少学者^[40-43]探讨森林植被林冠和枯落物层对土壤溅蚀的影响,但只局限在定性定量阶段。相关文献^[44-47]中利用溅蚀杯、浅蚀板方法研究植物冠层或枯落物层与土壤溅蚀率之间的定量关系,但类似工作仍少见报道。与群落结构复杂的原始林相比,人工林因其林分结构简单和缺少管理或过度干扰而导致枯落物层覆盖率和厚度下降等负面因素的影响,林下表层土壤溅蚀率可能会有明显的增加趋势,从而为后续的水力侵蚀提供更多输沙源。这对于维持人工林正常的土地生产力是十分不利的,但目前国内关于人工林土壤溅蚀的研究十分薄弱。

4 展望

如前所述,土壤溅蚀力学过程和森林土壤溅蚀过程方面的研究存在一定的不足。因而,对其进一步研究是绝对必要的。今后可从降雨雨滴动力学和土壤力学性质的角度来研究土壤溅蚀系统发生发展的力学过程及其机理,并在此基础上构建基于过程的土壤溅蚀模型。对于森林土壤溅蚀过程,许多研究只停留在定性和定量描述阶段,需加强森林土壤溅蚀过程及其机制的研究。建议将森林林冠、枯落物层的水文生态功能整合

到林下土壤溅蚀中,从过程、机制及数量关系方面来研究森林植被对土壤溅蚀过程的影响,为制定防止林地土壤侵蚀的措施、政策和基础研究提供相应的理论依据。

目前国内关于土壤溅蚀过程的研究大部分是在试验室内利用人工模拟降雨下的条件下完成的,在天然降雨条件下的研究工作较少。近年来, Van Dijk 等^[48]认为对于雨滴溅蚀的过程,室内的研究结果不容易应用到野外尺度,同时也认为,自然降雨背景下的实验研究对于提高溅蚀过程的理解是至关重要的。因此,今后在土壤溅蚀过程的研究中应充分考虑野外天然降雨试验条件的重要性和必要性。

在土壤溅蚀研究方法方面,国内将来的研究可侧重在对 Van Dijk 等^[2]提出的关于解释溅蚀分离和迁移测定的指数分布理论的验证及评价方面,以进一步发展和完善土壤溅蚀的测量方法。此外,除了较少的研究^[49-51]之外,大部分均没有将植被因素作为一个重要变量考虑到土壤溅蚀模型中。因此,今后应在探明森林植被土壤溅蚀过程与机制的基础上构建森林土壤溅蚀经验或理论模型中,对于更清晰描述和准确预测森林林地的表层土壤侵蚀量是十分必要的。

参考文献:

- [1] MORGAN R P C. Field Studies of Rainsplash Erosion[J]. *Earth Surface Processes*, 1978, 3: 295 - 298.
- [2] VAN DIJK A I J M, MEESTERS A G C A, BRUIJNZEEL L A. Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002b, 66: 1466 - 1474.
- [3] KINNELL P I A. Raindrop- impact- induced erosion processes and prediction: a review [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19 (14): 2815- 2844.
- [4] ELLISON W D. Soil erosion studies?Part 1[J]. *Agricultural Engineering*, 1947, 28: 145 - 147.
- [5] ELLISON W D. Studies of raindrop erosion[J]. *Agricultural Engineering*, 1944, 25: 131 - 136, 181 - 182.
- [6] MORGAN R P C. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan- Morgan- Finney model[J]. *Catena*, 2001. 44(4): 305 - 322.
- [7] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R 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(6), 527 - 544.
- [8] NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J, et al. A process based soil erosion model for USDA- Water Erosion Prediction Project technology [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1989, 32(5): 1587 - 1593.
- [9] ELLISON W D. Two devices for measuring soil erosion [J]. *Agricultural Engineering*, 1944, 25: 53 - 55.
- [10] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展[J]. *地理科学*, 2003, 23(2): 230 - 235.
- [11] 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[J]. *地理科学*, 1998, 18(6): 561 - 566.
- [12] SALLES C, POESEN J. Rain properties controlling soil splash detachment[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(2): 271 - 282.
- [13] MOSLEY M P. The effect of a New Zealand beech forest canopy on the kinetic energy of water drops and on surface erosion [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1982, 7(2): 103 - 107.
- [14] QUANSAH C. The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport [J]. *Journal of Soil Science*, 1981, 32: 215 - 224.
- [15] MIHARA Y. Raindrops and soil erosion [J]. *Bulletin of the National Institute of Agricultural Science*, 1951, Series A1, Japan, 48 - 51.
- [16] AL- DURRAH M, BRADFORD JM. Mechanism of raindrop splash on soil surfaces [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46: 1086 - 1090.
- [17] TERRY J P. A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 525 - 542.
- [18] 郭耀文. 雨滴侵蚀特征分析[J]. *中国水土保持*, 1997, 4: 15 - 17.
- [19] 吴普特, 周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响 [J]. *水土保持通报*, 1991, 11(8): 34 - 38.
- [20] 戚隆溪, 王柏懿. 土壤侵蚀的流体力学机制()——水蚀[J]. *力学进展*, 1995, 25(4): 501 - 514.
- [21] 郑粉莉, 江忠善, 高学田. 水蚀过程与预报模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [22] SREENIVAS L, JOHNSTON J R, HILL H O. Some relationships of vegetation and soil detachment in the erosion process[J]. *Soil Science Society Proceedings*, 1947, 12, 471 - 474.
- [23] EKERN P C. Raindrop impact as a force initiating soil erosion[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1950, 15: 7 - 10.
- [24] KINNELL P I A. Laboratory studies on the effect of drop size on splash erosion[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1982, 27:431 - 439.
- [25] BISAL F. The effect of raindrop size and impact velocity on sand splash[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1960, 40: 242 - 245.
- [26] KWAAD, F. Measurements of rainsplash erosion and the formation of colluvium beneath deciduous woodland in the Luxemburg. Ardennes [J]. *Earth Surface Processes*, 1977, 2: 161 - 173.
- [27] SAVAT J, POESEN J. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part I: The calculation of absolute data on detachability and transportability[J]. *Catena*, 1981, 8: 1 - 17.
- [28] WAN Y, EL- SWAIFY S A, SUTHERLAND R A. Partitioning interrill splash and wash dynamics: A novel laboratory approach [J]. *Soil Technology*, 1996, 9: 55 - 69.
- [29] GUMIERE SJ, BISSONNAIS Y LE, RACLOT D. Soil resistance to interrill erosion: Model parameterization and sensitivity [J]. *Catena*, 2009, 77(3): 274 - 284.
- [30] TORRI D, POESEN J. The effect of cup size on splash detachment and transport measurements. Part II: theoretical approach [J]. *Catena Supplement*, 1988, 12: 127 - 137.
- [31] POESEN J, TORRI D. The effect of cup size on splash detachment and transport measurements. Part I: field measurements [J]. *Catena*

- Supplement, 1988, 12: 113 - 126.
- [32] FERNANDEZ- RAGA M, FRAILE R, KEIZER J J, et al. The kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: An application to splash erosion[J]. Atmospheric Research, 2009, 96: 225 - 240.
- [33] 陈一兵. 测定溅蚀的方法研究[J]. 水土保持通报, 1994, 14(4): 34 - 38.
- [34] STROOSNIJDER L. Measurement of erosion: Is it possible? [J]. Catena, 2005, 64: 162 - 173.
- [35] SHARMA P P, GUPTA S C, RAWLS W J. Soil detachment by single raindrops of varying kinetic energy [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55: 301 - 307.
- [36] SHARMA P P, GUPTA S C. Sand detachment by single raindrops of varying kinetic energy and momentum [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 1005 - 1010.
- [37] NEARING M A, BRADFORD J M. Relationships between waterdrop properties and forces of impact [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 51: 429 - 530.
- [38] 杨明义, 田均良. 坡面侵蚀过程定量研究进展 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 649 - 653.
- [39] 李占斌, 朱冰冰, 李 鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 802 - 809.
- [40] 游 珍, 李占斌, 蒋庆丰. 植被对降雨的再分配分析 [J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(3): 102 - 105.
- [41] 王艳红, 宋维峰, 李财金. 不同森林类型林冠截留效应研究 [J]. 亚热带水土保持, 2008, 20(3): 5 - 10.
- [42] 范世香, 高 雁, 程英才, 等. 林冠对降雨截留能力的研究 [J]. 地理科学, 2007, 27(2): 200 - 204.
- [43] 韩学坤, 吴伯志, 安瞳昕, 等. 溅蚀研究进展 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 46 - 51.
- [44] 周 跃, 李玉辉, David Watts. 中国西南虎跳峡地区云南松林土壤侵蚀控制潜能(英文) [J]. 植物生态学报, 2000, 24 (1) 74 - 81.
- [45] 马 波, 吴发启, 马 番. 谷子冠层下的土壤溅蚀速率特征 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 130 - 135.
- [46] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 23 - 28.
- [47] 郭玉红, 郎南军, 郑 科, 等. 云南元谋干热河谷区加勒比松人工林枯落物层的水土保持功能研究 [J]. 西部林业科学, 2007, 36(3): 42 - 45.
- [48] VAN DIJK A I J M, BRUIJNZEEL L A, EISMA E H. A methodology to study rain splash and wash processes under natural rainfall[J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 153 - 167.
- [49] BRANDT J. The effect of different types of forest management on the transformation of rainfall energy by the canopy in relation to soil erosion[J]. Forest Hydrology and Watershed Management, 1987, Publ.no. 167.
- [50] MORGAN R P C. Establishment of plant cover parameters for modelling splash detachment. In: S.A.El- Swaify, W.C.Moldenhauer & A. Lo (eds.), Soil Erosion and Conservation [C]. Iowa: Soil Conservation Society of America, 1985, 377 - 383.
- [51] MORGAN R P C, DUZANT J H. Modified MMF (Morgan Morgan Finney) model for evaluating effects of crops and vegetation cover on soil erosion [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(1): 90 - 106.

A Review on the Process of Soil Splash Erosion and Its Study Approaches

LUO Qin- pu^{1,2}, LIU Wen- jie^{1*}

(1.Xishangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China;

2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.)

Abstract: Soil splash erosion - soil particle detachment and transport by raindrop impact - is the important first stage in the chain of processes leading to soil loss and subsequent sediment transport; it also is one of the most major reasons for causing water erosion on hillslopes. Researches on splash erosion process and its study approaches in foreign countries and China were briefly introduced with the aim of promoting the studies in this field in our country. According to the reports, soil splash erosion is one of the most important erosion processes, involving the combination of various hydrological processes, hydraulic processes and ecological processes, which are influenced by many factors, such as rainfall properties, soil characteristics and vegetation cover. Splash erosion includes a series of energy conversion process between impacting raindrop and soil surface. On the other hand, the important method of estimating soil splash erosion rates is splash cups, splash boards and splash trays. Additional research should take into account splash erosion mechanical process and splash erosion in forested landscapes.

Key words: Soil erosion; Soil Splash erosion process; Study approaches; Model; Research advances