

溅蚀研究进展

韩学坤, 吴伯志, 安瞳昕, 贺佳

(云南农业大学 农学与生物技术学院, 昆明 650201)

摘要: 溅蚀是水蚀的初始阶段, 是雨滴对地表击打直接作用的结果, 是一个动能减少, 地表土壤颗粒发生位移的过程。溅蚀主要发生在坡面产生径流之前和刚产生径流时, 是水蚀的主要形式之一。国内外学者对溅蚀的影响因素的研究主要集中在降雨特征、土壤特性以及地形因素等方面, 其中主要影响因子包括: 坡度、降雨特征、植被覆盖和土层结构。溅蚀量随坡度的增大逐渐增多, 但是坡度超过临界坡度时, 随坡度增大而减小; 随降雨强度和雨滴大小增大而增大; 地表植被对降雨有直接的再分配的过程, 主要表现为截流、透流和干流 3 方面, 当地表覆盖物超过 1 cm 时, 溅蚀可以完全消失; 不同级配的土壤颗粒抗溅蚀能力不同, 粒径在 0.15 mm 附近的颗粒最容易被溅蚀, 溅蚀同时随着土壤结皮厚度增大, 土壤抗溅蚀能力增强。然而目前国内外对溅蚀的研究主要是在实验室模拟条件下完成的, 较少有野外实地的研究, 更缺乏在实际农业生产条件下的研究。所以需要在前人的基础上结合我国有些地方坡耕地较多的情况, 在不同作物、作物生产方式和土地耕作方式等条件下, 探讨坡耕地溅蚀规律。

关键词: 水土流失; 溅蚀; 坡度; 降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)04-0046-06

Advance of Research for Splash Erosion

HAN Xue-kun, WU Bo-zhi, AN Tong-xin, HE-jia

(College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Splash is the first step of water erosion; it is the direct results of raindrop strike on soil; it is a process that raindrop kinetic energy is being reduced and the soil particles are being removed from here and there. Scholars researching the factors of rain splash from home and abroad focused on rainfall characters, soil characters and topography element, etc. The key factors for the raindrop splash include slope gradient, meteorology factors, plant coverage and structure of soil. Splash amount increased with rise of slope gradient, but it will decrease after the slope gradient more than a critical degree; increasing with higher intensity and larger diameter of rain drop. Surface plants could redistribute rain drop directly, which include cutting off flow, throughfall and trunk stream. If the thickness of surface covers is more than 1 cm, the rain splash could be avoided. Different sizes of soil particles have specific anti-splash ability. The particles whoes diameters are around 0.15 mm could be splashed most easily. Soil anti-splash ability could be improved with the increase of crust thickness. But most researches on the splash were done in simulation situation in laboratory, less under natural, and agricultural conditions. So splash researches should investigate into the patterns of rain splash under the condition of different crops, crop production approach and tillage styles in terms of the reality that slope farmlands cover a great part in some areas of China and achievements made by researches.

Key words: water and soil erosion; splash; slope angle; rain drop

溅蚀是水土流失的初期阶段^[1], 溅蚀会破坏土壤结构^[2], 增加径流紊动性^[3], 增强径流的分散和搬运能力^[4-5]。同时雨滴的打击作用使得土壤颗粒堵塞土壤本身的孔隙, 减少或者阻止了雨水的入渗, 从而极

大的增加了径流的侵蚀力^[6-7]。

雨滴大小是土壤溅蚀产生的物理基础。一定大小的雨滴具有一定的体积和质量, 在从高空下落过程中, 水滴的势能转化为动能, 即具有一定的速度和动

收稿日期: 2010-01-13

资助项目: 文山丘北辣椒优质高产新品种选育及配套技术与示范(2006NG17)

作者简介: 韩学坤(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 山地农业可持续发展。E-mail: 309087608@qq.com

通信作者: 吴伯志(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 耕作制度及耕地水土保持。E-mail: bozhiwu@hotmail.com

量。当撞击到土地表面或水层, 动量转化为冲量, 其产生的冲压为单位面积雨滴动量的损失率。该损失率与土地表面单位面积的动量增加率相等^[8], 这个过程为后续径流搬运提供了丰富的土粒。直径为 5 mm 的雨滴降落到地面的最大速度可以达到 9 m/s, 如落在湿土上, 可使土粒溅起 75 cm 高, 土粒的移动范围可达到 1.2~1.5 m^[9]。虽然单个雨滴的体积微不足道, 但是它的冲击力是不小的, 另外单次降雨的雨滴总数是数不清的, 所以总的溅蚀量相当惊人。也就是说土壤侵蚀可以发生在没有径流的情况下。只要雨滴滴落在裸露的地表, 就能使土壤分散、破裂和溅起, 从而破坏土壤结构。该过程在坡耕地表现更加明显。就坡地而言, 由于雨滴冲击土壤的能力在坡地上总体是均匀分布的, 也正是这种均一性, 使得坡地顶部的土壤损失比较大, 而中下部分因为有土粒被击溅后向下坡移动而得到补充。在 6° 坡度的地面上, 土壤溅蚀量大概 75% 向下坡移动^[9]。雨滴的溅蚀也直接影响地表径流。雨滴作用于径流, 引起径流紊乱, 增大径流的动能, 可使径流挟沙能力增大 12 倍^[10]。另外由于溅蚀溅起的细土粒堵塞了土壤孔隙, 降低了土壤的渗透性, 从而雨滴降落后直接转为径流, 从而增大径流量, 也加强了溅蚀与坡地径流的联合侵蚀作用, 加剧水土流失。同时土体密实板结, 团粒结构被破坏, 适耕性也降低^[11]。

W. D. Ellison 等通过大量试验, 认为雨滴溅蚀是引起土壤侵蚀的重要因素; 他还把土壤侵蚀分为 4 个阶段: 首先是雨滴对土壤的溅蚀、其次是径流的侵蚀、再次是雨滴对溅蚀产生土粒的搬运、最后阶段是径流对土粒的搬运^[12]。国内外的不少学者^[13-18]也进行了这方面的研究, 通过各种方法在不同的地域和环境条件下测定, 总体认为影响溅蚀的主要因素包括 4 大方面: 坡地的坡度、降雨特征、植被覆盖、土层结构。

1 影响溅蚀的因子

1.1 坡度

赵晓光、吴发启在含水量 6% 的情况下测定不同雨滴直径在不同坡度的条件下的溅蚀量得出, 同一雨滴直径, 即相同雨滴动能情况下, 溅蚀量随坡度增大而增多, 达到极限值后, 随坡度增大而减小。这种变化随雨滴直径增大而趋于明显。对直径 < 3 mm 的雨滴, 其溅蚀量很小而且变化微弱。直径 > 4 mm 的雨滴, 其溅蚀量有明显增加而且变化显著。国外学者把坡度和土壤侵蚀量之间进行了量化研究, 英国 N. W. Hudson^[19]研究的关系式为 $E \propto Sa$, 式中: E ——土壤侵蚀量; S ——坡度 (以百分数计); a ——指数。

A. W. Zingg 研究认为 a 约为 1.49, 他还研究证实了坡度增加一倍土壤流失量增加 2.61~3.80 倍。Hudson 认为 a 为 1.5。还有学者认为热带地区侵蚀严重, 应取 2。Lopa Gold 研究认为坡度 < 10° 时, 土壤流失量与坡度的 1 次方成正比; 坡 > 10° 时, 土壤流失量与坡度的 0.86 次方成正比。

由于各研究者的研究环境有很大差别, 所以实验研究中所得坡度和坡长对溅蚀的影响程度也不一样。故有学者总结认为冲刷量大致与坡度的 0.8~3.4 次方成正比。我国水土保持研究所蒋定生等^[20]的实验结果表明, 坡度在 0~25° 范围内, 土壤冲刷随坡度的变陡而增加, 增长的速率为每度 0.007 kg, 往后逐渐减少, 到 20° 时, 递增速率降为每度 0.001 6 kg。当坡度超过 25° 时, 土壤溅蚀量反而下降。所以很多学者认为坡度为 25° 为溅蚀转折坡度。中国科学院地理研究所陈永忠提出, 在黄土丘陵沟壑区, 溅蚀转折坡度大约在 25°~28.5°。西北大学刘兴昌^[21]先生提出: 这个坡度为 40°。同时向上坡的溅蚀量的临界坡度为 10°~15°。吴普特^[22]等对坡面的各个方向的溅蚀也做了研究观测, 结果为向上坡溅蚀量与地表坡度为抛物线型关系, 临界坡度在 10°~15° 之间, 在一般情况下, 向侧坡溅蚀量与地表坡度也呈抛物线型关系, 临界坡度在 20°~25° 之间; 但当雨强较大时, 临界坡度消失。关系转为幂函数关系。向下坡溅蚀量与地表坡度呈线性递增关系, 且递增率随雨强的增加而增大。

产生上述结果的原因是多方面的, 首先是土粒本身重力的作用。被溅起的土粒, 运动轨迹是随机的。由于重力的作用, 产生一个向下的分力。这样的重力作用对向下坡溅蚀即产生了一个动力。坡度越大, 这种分力越大, 因此向下坡的溅蚀量越大。据 J. B. Sloms^[23]研究, 在 10% 的坡度上, 雨滴向坡下的击溅距离大约是向坡上击溅距离的 3 倍, O. S. Gland^[24]也提出, 在有坡度的旷野, 雨滴击溅土壤的移动, 向坡下的也要比向坡上的远, 量也要大, 同时也提出和渗透作用有关系。当坡度较大时以径流作用为主, 如果坡度较小时以渗透作用为主。所以渗透作用在减少土壤侵蚀方面也有积极的作用^[25]。再者就是, 坡度对承雨面积的影响, 如果雨滴垂直水平降落在地表, 则地表面积就是承雨面积。由于斜坡斜面积要比其本身的投影面积大。因此, 坡度越大, 斜坡水平投影面积就越小。水平投影面积正是承雨面积, 所以单位面积承受的雨量以及单位面积雨量都要以水平面积来计算。如果把水平面积承受的雨量平均分配到斜坡上, 则单位面积上承受的雨量变小, 所以单位面积的

溅蚀量也变小。从而坡度到达一定的值时,坡度增大,溅蚀量反而降低^[26]。

坡长对溅蚀也有一定的影响。汤立群^[27]研究指出,一般水深超过 3 倍雨滴直径时,雨蚀作用就消失。所以可认为,当坡面的溅蚀作用刚好消失的时候(即坡面水深等于 3 倍雨滴直径的时候)所对应的坡长为坡面的雨滴溅蚀的有效坡段长。由坡面汇流理论^[28]可知,在恒定降雨强度条件下,随着汇流量的增大,从而径流的深度就逐渐变深,当径流深度等于 3 倍雨滴直径的时候,溅蚀理论上消失,则所对应的坡长就为最短有效坡段。

1.2 降雨特征对溅蚀影响

降雨特征包括降雨量、降雨强度、雨滴级配、雨型、雨滴终速度、降雨分布等,其中雨强、雨滴级配、雨滴终速对溅蚀的影响最明显。国内外学者^[29-33]对降雨特性及其与溅蚀的关系、降雨溅蚀机理及其土壤特征对溅蚀的影响研究取得了重要进展。他们认为降雨特征是影响土壤溅蚀过程的主要因素。不同的研究者选择了不同的降雨特征^[34],Ellison 和 Bisal 用的是雨滴的大小和终速,Rose 用的是降雨动能,Parcket 用降雨动能,Forster and Meyer 用的是降雨强度,Free 用的是降雨侵蚀力指标。范荣生等^[35]认为雨强与雨滴动能有密切关系,雨强大,雨滴直径也大,雨滴动能也大,故雨滴溅蚀能力也就大。雨型的作用主要是通过影响产汇流过程间接的影响降雨击溅。

单雨滴的击溅效果是很微小的,我们主要讨论的是众多雨滴的接力效果,以及和径流等因素结合的总效果。比如赵晓光的研究表明直径<3 mm 的雨滴,其溅蚀很小,而>4 mm 的雨滴溅蚀量明显,而且随坡度的变化明显。当然溅蚀不是单独发生的,它可以和径流相互左右。樊萍,宋维秀^[36]等人关于雨滴直径对溅蚀的研究结果为:对不同雨滴直径与溅蚀量做相关分析的相关系数为 $r=0.9996, 0.7 < |r| < 1$ 。达到极显著水平,说明雨滴直径与溅蚀量呈正相关关系。Richard payne 通过电影摄像和水滴收集法,采用两种不同大小的降落水滴,两种不同的降落高度,对溅蚀水滴的特性进行研究得出,当一个 6 mm 直径的水滴用接近自由落体的速度降落时,大约产生 5 000 个溅蚀水滴,其水滴直径有 10 μm 到 3 mm;在地面有水的情况下,溅蚀水滴搬运的土壤物质相当少;当降落水滴增大时,搬运的物质也相应增多;在溅蚀水滴的形成过程中,随着撞击能量的增加,溅蚀水滴获得的能量、动量与撞击水滴的能量、动量之比也随之提高,但不是一个稳定的常数。Guy^[37]研究坡面流的输沙问题表明,雨滴溅蚀作用主要发生在 d/h

值在 0.145~0.389 的范围内(式中: d ——雨滴直径; h ——坡面水深)。汤立群^[27]的研究表明:一般情况下水深超过 3 倍雨滴直径时,雨蚀作用就消失。陈一兵^[38]用不同的溅蚀收集方式研究,虽然得出溅蚀量在各测定方法间有一定差距,但有个共同的规律,就是不管用哪种方法测定,溅蚀量总是随着降雨强度增大而增大。

1.3 植被覆盖对土壤溅蚀的影响

不同种类的植被覆盖对抗溅蚀能力有不同的影响,地表植被对降雨有直接的再分配过程。主要表现为截流、透流和干流 3 方面。截流主要是指乔木、灌木、草本的林冠部分的截流。有关的经验模型^[39-40]和理论模型^[41-43]都比较成熟,其中最具有代表性的模型为

$$R(z,t)/z = -R(z,t)D(z,t)U(z)G(z)$$

式中: R ——雨强; D ——林冠干燥度(0~1); U ——林冠叶面积密度; G ——枝叶在地面上的投影比率; z ——垂直坐标; z 在 0 到 H 之间; H ——冠层厚度。

透流主要由两部分组成,雨滴直接从枝叶空隙中落到地面、雨滴在树叶上和枝干上聚集,因超过枝叶承受能力而落到地表。干流就是雨水直接通过树干流到地表,干流量与枝干的光滑度和密度、数量有密切关系。

游珍^[44]等人的研究表明,枯落物的覆盖度与溅蚀量呈负相关,枯枝落叶盖度越大,溅蚀能量越小;在降雨量达到透流(经枝叶聚集部分)的临界雨量后,植被高度是所有植被特征中影响溅蚀能量贡献最大的因子,植被越高,溅蚀能量越大;在降雨量达到透流的临界值以后,雨滴终速度越大,植被所能减少的溅蚀能力越多。王艳红^[45]等人对不同植被的森林冠截流效应研究表明不同的植被对土壤侵蚀的影响不一样。他们选用了 7 种有代表性的植物来观察,结果为该 7 种森林类型冠截留量的变幅从大到小的顺序为麻竹(100.5 mm)>马占相思(62.4 mm)>勃氏甜龙竹(48.4 mm)>混交林(48.3 mm)>红竹(26.4 mm)>桉树(23.0 mm)>毛竹(10.1 mm)。林冠层作为截留降水的第一作用层,对阻挡雨水侵蚀,减小小雨滴的溅蚀,发挥了巨大作用。国外的研究结果也表明,穿透降水中由林冠叶面汇集形成的滴流,其下落水滴大小受植被类型的影响。大叶树种形成的水滴远大于针叶树种形成的水滴,这与热带阔叶树种的截流量要小于温带针叶林相一致。范世香^[46]等研究表明,林冠枝叶空间分布越均匀,林冠枝叶量越多,其饱和和截留容量越大。

对于地表覆盖物对溅蚀的影响,韩冰^[47]等人对天然雨下 30 a 山杨林内溅蚀试验结果表明,在同一

土壤坡度条件下,最大 30 min 雨强、林内降雨量、枯落物层厚度 3 因素是影响溅蚀量的主要因素,而且溅蚀量与其呈二次多项式回归关系,但是当枯落物层具有一定厚度时溅蚀与其他因素无关。溅蚀主要发生在清除枯落物层的林下,随枯落物层厚度增加,溅蚀量剧减,当枯落物层积累到 1 cm 时,枯落物防止土壤溅蚀量达 97.50%;同时残渣和秸秆也有类似的效果。王育红、吕军杰^[48]等研究表明,坡耕地覆盖秸秆和残渣具有保持水土、减少土壤侵蚀的效果。而且随着覆盖度和覆盖年限的增加而更明显。在雨强为 80,100 mm/h 的模拟降雨条件下,与不覆盖相比,泥沙侵蚀量分别减少 97.8%~98.8%、溅蚀基本没有,降雨入渗增加 2.12 倍到 1.87 倍。同时大幅降低了侵蚀沉淀中 N、K 的浓度以及土壤 N、K 的总流失量。

1.4 土层结构

汤立群针对黄土地的研究表明,前期土壤含水量大,易产生溅蚀。同时也因为前期土壤含水量大,易于产生径流,虽然减少了溅蚀程度,但是增大了径流侵蚀程度。所以总侵蚀量增大。Wollny^[49]也论述了雨滴使土粒分散,细小颗粒填充土壤孔隙使土表封闭,从而降低其渗透能力,增加了径流侵蚀量。范荣生认为土壤颗粒的级配对溅蚀强度的影响较大。细沙最易被溅蚀,粗颗粒泥沙以及具有粘性的更细颗粒泥沙则不易被溅蚀。程琴娟^[50]等研究表明:不同颗粒大小的土粒溅蚀量差异明显,粒径在 0.15 mm 附近的颗粒最容易被溅蚀;在一定的降雨历时的情况下,不同粒径的颗粒表皮发育完善程度不一样,从而反映出溅蚀率的变化。表土含水率也直接影响着溅蚀量的大小,在含水率 3.2%~16.5% 的范围内,随着含水率的增加,溅蚀量呈上升趋势,到 16.5% 时达到最大值。在 16.5%~26.9% 的范围内,随着含水率继续增加,溅蚀量呈下降趋势,在 26.9% 时最低^[51]。宋维秀研究表明土壤的溅蚀量随着含水率的增大而增大。由于含水率与表土结皮强度之间呈负相关,含水率越大,其结皮强度越小,抗溅蚀能力减弱,因此开始产生溅蚀的雨滴数就越多,相应溅蚀量越大。

土壤的结皮是土壤被较长时间的降雨击打、夯实的作用下产生的结果,是一个雨滴冲击对团聚体的破坏、细颗粒的向下移动和雨滴冲击对表面的压实的过程^[52-55]。同时,结皮对降雨产生的溅蚀也有很大的影响^[56-57]。结皮具有一定的抗溅蚀力,而且结皮越厚抗溅蚀力越强。宋维秀在结皮与结皮溅蚀量之间关系的研究中,选择结皮厚度分别为 3.2, 3.29, 3.38,

3.84, 3.87 mm。研究得到的结论是结皮厚度和溅蚀量呈负相关。Farres^[58]认为一旦结皮形成,它就保护表面下的团聚体免受雨滴的冲击,这样就切断了结皮进一步发育的物质来源。吴发启等^[51]通过结皮土壤与无结皮土壤的对比得出,有结皮土壤的溅蚀量总是小于没结皮的土壤。可见结皮对雨滴溅蚀有很大的抵抗能力。胡霞等人^[59]通过人工模拟降雨溅蚀试验,测定土壤溅蚀速率,同时采样制作土壤切片观察分析结皮的发育特征以及与土壤溅蚀的关系。结果表明:土壤结皮随着土壤表面大团聚体或者大颗粒的分散而形成,并且伴随着下层大孔隙的出现。土表结皮的完善过程,也是土壤抗溅蚀能力的增强的过程。虽然结皮对溅蚀的影响毋庸置疑,但是还不清楚结皮影响在土壤溅蚀量中所占的比重大小,结皮影响土壤溅蚀以及侵蚀的机理也不十分清晰^[60]。

土壤结皮是在物理分散和化学分散力控制下,随着团聚体的分散而形成^[61]。其表面强度较大,孔隙较细,且导水性较差,分为结构结皮和沉积结皮两种类型^[62-63],很多研究表明:结皮是侵蚀产沙过程中的重要影响因素,它能减少入渗,减小地表粗糙度,增加地表径流,降低溅蚀速率^[64-65]。还有一些研究认为,由于前期结皮的影响,致使产沙的初始降雨临界条件大大减少,从而极大地增加了诱发细沟侵蚀的可能,最后使坡面径流系数、累计径流量、侵蚀模数和累积产沙量会比前期没有结皮的情况增加数倍至数十倍。结皮的形成是一个动态变化过程,随时会被雨滴击溅,地表径流的冲刷作用破坏又不断形成新的结皮。静态孤立地考虑结皮的形成过程不可能完全了解土壤结皮形成的过程和特征,因此在时间序列中动态描述结皮形成过程特征很有必要。Kinnell^[66]根据土壤侵蚀中雨滴和径流的相互作用建立 4 个输沙系统:雨滴剥蚀和溅蚀迁移系统,雨滴剥蚀和雨滴引发的水流迁移系统,雨滴剥蚀和水流的迁移系统,水流剥蚀和水流迁移系统。并认为这些系统间是可以相互起作用,也可以单独作用的。

2 展望

从上述综述可知,国内外许多学者围绕溅蚀的影响因子进行了大量的研究,对溅蚀的成因机理、发展过程、以及危害都有较全面的认识,对影响因子间的相互关系也进行了探讨。并且对各因子进行了大量的量化处理,分析、探索出不少的溅蚀模型。但是大部分学者对溅蚀的研究主要集中在实验室模拟状态下完成的,较少有野外的实地研究,更缺乏作物生产的大田情况下溅蚀规律的探讨。需要结合实际农业

生产,特别是在我国坡地较多,利用模式及措施较不合理的情况下,结合不同的作物生长方式,和坡地的耕种方式,在农业生产条件下探讨溅蚀的规律,寻求有利于减轻土壤侵蚀、科学实用的生产和耕作方式具有理论和实际意义。

参考文献:

- [1] 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): 230-231, 235.
- [2] Ellison W D. Soil Erosion Study(Part II) Soil detachment hazard by raindrop splash[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1947, 28: 197-201.
- [3] Ellison W D. Soil Erosion Study(Part V) Soil transport in the splash process[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1947, 28: 349-351, 353.
- [4] Ellison W D. Two Devices for Measuring Soil Erosion[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1944, 25: 53-55.
- [5] Ellison W D. Studies of Raindrop Erosion [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1944, 25: 131-136, 181-182.
- [6] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报, 1982, 2(3): 36-41.
- [7] Carson MA, Kirkby M J. Hillslope Form and Process [M]. London: Cambridge University Press, 1972: 200.
- [8] 赵晓光, 吴发启. 单雨滴溅蚀规律及其对溅蚀土粒的分选作用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 43-45.
- [9] 代明侠, 徐倩. 溅蚀的研究及防治[J]. 黑龙江水利科技, 2005, 5(3): 33-33.
- [10] 方正三. 水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 1958.
- [11] 郭耀文. 降雨侵蚀原理分析[J]. 甘肃农业科技, 1997(1): 28-30.
- [12] Ellison W D. soil erosion studies(part I)[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1944, 25: 53-55.
- [13] 江忠善, 刘志. 水土保持概况[J]. 水土保持学报, 1989, 3(2): 29-35.
- [14] 陈浩. 黄河流域水土流失探讨[J]. 人民黄河, 1986(1): 21-24.
- [15] 蔡国强, 陈浩. 中国水土保持[J]. 水土保持学报, 1986, 1(6): 30-33.
- [16] 赵鸿雁, 吴钦孝, 韩冰. 影响水土流失主要因子的研究[J]. 水土保持研究, 1995, 2(3): 99-102.
- [17] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion[J]. Soil Science Society of American Journal, 1994, 58: 203-209.
- [18] Bajracharya R M, Lal R. Crusting effects on erosion processes under simulated rainfall on a tropical alfisol[J]. Hydrol. Process, 1998, 12: 1927-1938.
- [19] Hudson N W. 土壤保持[M]. 窦葆璋, 译. 北京: 科学出版社, 1976.
- [20] 蒋定生. 地面坡度对降水入渗影响的模拟实验[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 55-58.
- [21] 辛树帜, 蒋德麟. 中国水土保持概论[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- [22] 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(3): 8-11.
- [23] Kirbeby M J. 土壤侵蚀[M]. 王礼先, 译. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [24] Gland O S. Soil and water conservation engineering [M]. London: Cambridge press, 1981.
- [25] 刘光正, 潘江平, 岳军伟. 江西红壤低丘水土流失发生规律和防治对策[J]. 江西林业科技, 2008(4): 7-9.
- [26] 席有. 坡度影响土壤侵蚀的研究[J]. 中国水土保持, 1993(4): 19-21.
- [27] 汤立群. 坡面降雨溅蚀及其模拟[J]. 水科学进展, 1995, 6(4): 304-310.
- [28] Woolhiser D A, Liggett J A. Unsteady one-dimensional flow over a plane[J]. Rising Hydrograph Water Resources Research, 1967, 3(3): 753-771.
- [29] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forest[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1979, 105: 43-55.
- [30] Wischmeier W H, Smith D D. A universal soil loss equation to guide conservation farm planning[C]. Trans. 7th International Cong. Soil Sci. I, 1960: 418-425.
- [31] Young R A, Wiersma J L. The role of rain fall impact in soil detachment and transport[J]. Water Resources Research, 1973, 9(6): 1629-1636.
- [32] Al-Durrach M M, Bradford J M. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact[J]. Soil Science Society of American Journal, 1981, 45: 949-953.
- [33] Nearing M A, Bradford J M. Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 1985, 49: 547-552.
- [34] 陈国祥. 土壤侵蚀与流域产沙的物理过程及预报模型 C//全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集(第1卷). 中国水利学会泥沙专业委员会. 1992: 214-257.
- [35] 范荣生, 李占斌. 坡地降雨溅蚀及输沙模型[J]. 水利学报, 1993(6): 24-29.
- [36] 樊萍, 宋维秀, 魏国良. 单雨滴降雨对结皮土壤溅蚀的影响[J]. 青海大学学报, 2005(1): 59-61.
- [37] Guy B T, Dickinson W T, Rudra R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow [J]. Trans ASAE, 1987, 30(5): 1378-1386.
- [38] 陈一兵. 测定溅蚀的方法研究[J]. 水土保持通报, 1994, 14(4): 34-38.

- [39] Merriam R A. A note on the interception loss equation [J]. *Geophys. Res.*, 1960, 65: 3850-3851.
- [40] Horton R E. Rainfall interception [J]. *Mon Weather Rev.*, 1919, 47: 603-623.
- [41] Aeton A R. Rainfall interception by eight small trees [J]. *J. Hydrol.*, 1979, 42: 383-396.
- [42] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, et al. A predictive model of rainfall interception in forest, I. Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine [J]. *Agric Meteorol.*, 1971, 9: 367-384.
- [43] Rutter A J, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests III, Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables [J]. *J. Appl Ecol.*, 1977, 14: 567-588.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 范世香, 高雁, 程银才, 等. 林冠对降雨截留能力的研究 [J]. *地理科学*, 2007, 27(2): 200-204.
- [47] 韩冰, 吴钦孝. 山杨林地枯落物层对溅蚀的影响 [J]. *植物资源与环境*, 1994, 3(4): 5-9.
- [48] 王育红, 姚宇卿, 吕军杰. 残茬和秸秆覆盖对黄土坡耕地水土流失的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(4): 109-111.
- [49] Wollny E. Der Einfluss Der Pflanzendecke Und Beschattung Auf Die Physikalischen [M]. *Eigenschflen Und Die Fruchtbarkeit Des Bodens*. Berlin, 1877: 171-174.
- [50] 程琴娟, 蔡国强, 胡霞. 不同粒径黄绵土的溅蚀规律及表土结皮发育研究 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 393-395.
- [51] 吴发启, 范文波. 土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究 [J]. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 1-3.
- [52] Norton L D. Micromorphological. Study of surface seals developed under simulated rainfall [J]. *Geoderma*, 1987, 40: 127-140.
- [53] 蔡强国. 表土结皮在溅蚀和坡面侵蚀过程中作用 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [54] McIntyre D S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact [J]. *Soil Science*, 1958, 85: 261-266.
- [55] 朱远达, 蔡国强, 胡霞, 等. 土壤物化性质对结皮形成的影响 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 13-19.
- [56] Agassi M, Morin J, Shainberg I. Effect of raindrop impact energy and water salinity on the infiltration rate of sodic soil [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 176-190.
- [57] 张光远, 蔡崇法. 黄绵土表层结皮的微形态特征及理化性质的研究 [C]// 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [58] Farres P. The role of time and aggregate size in the crusting process [J]. *Earth Surface Processes*, 1987, 3: 243-254.
- [59] 胡霞, 严平, 李顺江, 等. 人工降雨条件下土壤结皮的形成以及与土壤溅蚀的关系 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 13-16.
- [60] Morin J, Van Winkel J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation [J]. *Soil Sci, Soc. Am. J.*, 1996, 60: 1223-1227.
- [61] 江忠善, 刘志, 贾志伟. 降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究 [J]. *水土保持学报*, 1989, 3(2): 29-35.
- [62] 骆东奇, 候春霞, 魏朝富, 等. 紫色土团聚体抗蚀特性研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 1(2): 20-23.
- [63] Bradford J M, Ferries J E, Remley P A. Interill soil erosion processes I Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment [J]. *Soil Sci.*, 1987, 51: 1566-1577.
- [64] 蔡国强, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原侵蚀产沙过程与模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [65] Bradford J M, Huang L. Comparison of interill soil loss for laboratory and field procedures [J]. *Soil Technology*, 1993, 6(2): 154-169.
- [66] Kinnell P I A. The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 1004-1008.

(上接第 45 页)

参考文献:

- [1] 魏成阶, 刘亚岚, 王世新, 等. 四川汶川大地震震害遥感调查与评估 [J]. *遥感学报*, 2008, 12(5): 673-682.
- [2] 王治华, 周英杰, 徐斌, 等. “5·12”汶川大地震震中区映秀镇地震灾情及次生地质灾害遥感初步调查 [J]. *国土资源遥感*, 2008, 2(76): 1-4.
- [3] 陈世荣, 马海建, 范一大, 等. 基于高分辨率遥感影像的汶川地震道路损毁评估 [J]. *遥感学报*, 2008, 12(6): 949-954.
- [4] 王运生, 罗永红, 吉峰, 等. 汶川大地震山地灾害发育的控制因素分析 [J]. *工程地质学报*, 2008, 16(6): 759-763.
- [5] 徐新艳. 基于 GIS 的滑坡灾害危险评价研究: 以镇江市市区为例 [D]. 南京: 南京师范大学, 2007.
- [6] 白世彪, 间国年, 盛业华. 基于 GIS 的长江三峡库区滑坡影响因子分析 [J]. *山地学报*, 2005, 12(3): 63-70.