

风矢量对坡面降雨动能分布的影响

蔡丽君 王国栋

(西北农林科技大学 生命科学学院,陕西 杨凌 712100)

摘要 风矢量的存在既改变了雨滴的下降速度,也改变了雨滴溅击地面的角度,对坡面雨滴溅蚀的影响很大。只有垂直于坡面的雨滴速度分量所决定的降雨动能才是坡面溅蚀的初始动力。故将静风条件下的雨滴最终速度和风矢量分解,得到垂直于坡面的雨滴合速度。根据雨滴速度的分布律,导出了雨滴动能的分布函数和分布密度,并通过积分求得不同风速条件下雨滴动能均值随坡向坡度的分布规律。

关键词 风矢量;雨滴动能;坡面侵蚀

中图分类号 S 12

文章编号 1007-4333(2003)06-0015-03

文献标识码 A

The effects of the wind vector on the distribution of raindrop kinetic energy over sloping field

Cai Lijun, Wang Guodong

(College of Life Science, Northwest Sci. & Tech. University of Agriculture and Forestry, Shaanxi Yangling 712100, China)

Abstract The kinetic energy of raindrop plays an important role in surface erosion processes. Wind affects not only the raindrop terminal velocity, but also the directional tilt of the raindrops, by which the angle of raindrop impacting on the soil surface will be determined. Thus it shows great influence on splash erosion on sloping field. The part of raindrop kinetic energy vertical to sloping field will be regarded as a kind of prime mover for splash erosion. Based on the distribution of raindrop terminal velocity, the raindrop kinetic energy distribution function and its density function were developed. As a consequence, the distribution of average raindrop kinetic energy over sloping field was obtained through calculus which varied with wind velocity, slope gradient and slope aspect as well as raindrop density.

Key words wind vector; raindrop kinetic energy; erosion on sloping field

降雨侵蚀力是决定土壤侵蚀程度的重要因素之一。国内外许多学者指出,雨滴溅蚀作用是引起片蚀的主要侵蚀力^[1,2]。坡地是土壤侵蚀的主要发生地之一。尽管 Wishmeier 和 Smith^[3]很早就强调了风矢量对雨滴速度和动能的影响,但大多数研究采用的还是不考虑风矢量影响的垂直降落的雨滴速度和降雨强度与降雨动能之间的经验函数^[4],只有少数研究涉及降雨强度、降雨动能和风矢量之间的关系^[5~8]。涉及风矢量影响降雨动能理论分布的研究则很少见到。

风矢量本身具有较大的不确定性(风矢量具有明显的脉动性以及观测精度相对不高),导致其与降

雨强度和降雨动能分布的关系不易确定,不同时间和空间条件下观测的数据变异较大,试验的可重复性相对较低。风矢量与坡面降雨动能之间的关系非常复杂,影响因素众多,必须综合起来考虑。风的作用主要表现在两方面:一是增大了雨滴下降的合速度,亦即增大了雨滴动能,其结果是导致迎风坡的土壤侵蚀量大大高于背风坡^[9];二是改变了雨滴溅击地面的角度,从而影响了雨滴的做功效应。只有垂直于坡面的雨滴速度分量决定的降雨动能才是坡面溅蚀的初始动力。因此需研究风矢量作用下降雨动能随坡向坡度的分布。Helming^[8]通过两年的实验观测研究,获得了许多风矢量伴随阵性降水条件下

收稿日期:2003-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(39670427)

作者简介:蔡丽君,讲师,主要研究方向为土壤物理学

降雨动能随坡向坡度分布的观测资料。笔者试图从理论上探讨风矢量、坡向与坡度,以及降雨强度对坡面降雨动能分布的影响,并得到了坡面降雨动能的分布律和降雨总动能。

1 垂直于坡面的雨滴速度及分布规律

1.1 垂直于坡面的雨滴速度 v^*

设: v_1 为静风条件下雨滴垂直下降最终速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_2 为水平风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; α 为坡面的坡度, ($^\circ$); β 为风向与坡面法线方向的夹角, ($^\circ$)。当存在大气的水平运动时,垂直于坡面上的雨滴速度 v^* 等于静止大气中的雨滴速度及风速分别在垂直于坡面上的分量 v_1^* , v_2^* 之和,即

$$v^* = v_1^* + v_2^* \quad (1)$$

且 $v_1^* = v_1 \cos \alpha$, $v_2^* = v_2 \cos \beta \sin \alpha$ 。故 v^* 可表示为

$$v^* = v_1 \cos \alpha + v_2 \cos \beta \sin \alpha = av_1 + bv_2 \quad (1')$$

其中 $a = \cos \alpha$, $b = \cos \beta \sin \alpha$ 。在迎风坡 (270°

90°), a, b 值均大于 0, $v^* > v_1^*$, 风矢量将使得垂直于坡面上的雨滴合速度增大;在背风坡 (90°

270°), b 值小于 0, $v^* < v_1^*$, 风矢量将使得垂直于坡面上的雨滴合速度减小。

1.2 v^* 的分布律

根据钱允祺等^[10]求得的静风条件下的雨滴速度 v_1 分布律,可求出垂直于坡面的雨滴速度 v^* 的概率分布函数为

$$F(v^*) = P(v < v^*) = P(0 < av_1 + bv_2 < v^*) = P\left(0 < v_1 < \frac{v^* - bv_2}{a}\right) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v^* - bv_2}{aA_1}\right)^{B_1}\right] \quad (2)$$

其中: v 为雨滴速度作为随机变量的取值, A_1 为雨滴速度分布的尺度参数, B_1 为雨滴速度分布的形状参数。当坡向、坡度、及风速给定后,垂直于坡面的雨滴速度的分布函数被唯一确定。

2 垂直于坡面的降雨动能的理论分布

确定了垂直于坡面上的雨滴合速度 v^* 后,具有该合速度的单位质量 (1 kg) 雨滴群的动能 $E_k(J)$

则为

$$E_k = \frac{1}{2} v^{*2} \quad (3)$$

由于风的作用,垂直于坡面的雨滴速度会随之改变,必然也引起坡面降雨动能的改变。由式(2)和(3),可导出由 v^* 决定的降雨动能的概率分布函数:

$$F(E_k) = P(v < E_k) = P\left(0 < \frac{1}{2} v^{*2} < E_k\right) = P\left(0 < v^* < \sqrt{2E_k}\right) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{-bv_2 + \sqrt{2E_k}}{aA_1}\right)^{B_1}\right] \quad (4)$$

其中 E_k 为雨滴动能作为随机变量的取值。对式(4)求导,得坡面降雨动能的分布密度函数:

$$f(E_k) = \frac{B_1}{\sqrt{E_k}} \left[\left(\frac{-bv_2 + \sqrt{2E_k}}{aA_1} \right)^{B_1 - 1} \right] \cdot \exp\left[-\left(\frac{-bv_2 + \sqrt{2E_k}}{aA_1}\right)^{B_1}\right] \quad (5)$$

式中: $B_2 = \frac{\sqrt{2} B_1}{2 a A_1}$ 。由于雨滴动能的分布是按单位质量 (1 kg) 雨滴速度的分布导出的,同时, 1 m^2 面积上 1 mm 降水量的质量数正好是 1 kg,故式(5)中的动能单位为 $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

得到了坡面上降雨动能的分布后,就可以通过积分的方法求得不同条件下的降雨总动能:

$$E = \int_0^{45.1} E_k f(E_k) dE_k \quad (6)$$

理论上,式(6)中积分上限应取无穷大,然而实际降雨的雨滴谱中,一般不存在最终速度大于 $9.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的雨滴^[11],故由式(3)可得雨滴动能谱密度的上限值为 $45.1 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

将风速、风向、坡度等参数代入式(6)即可得到不同条件下坡面降雨总动能的分布。图1给出了降雨强度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、风速分别为 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时坡面上降雨动能随坡向的分布。

由图1可见,坡度愈大,迎风坡与背风坡的降雨动能之差愈大;风速愈大,迎风坡与背风坡的降雨动能之差也愈大。当风斜吹向山坡时,垂直于坡面的降雨动能值介于正迎风坡和正背风坡之间,由风速、风向、降雨强度、以及坡度等因素共同决定。

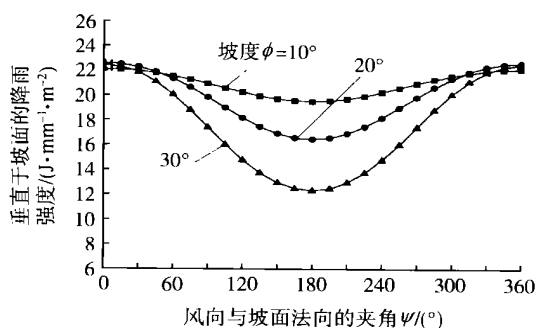
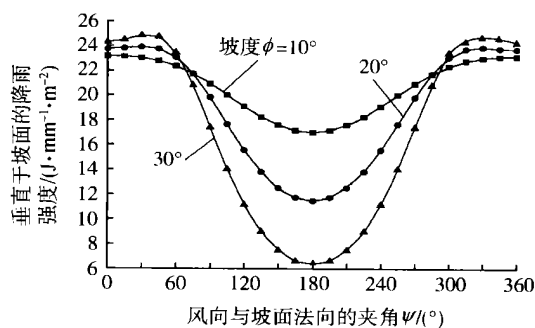
(a) 风速 2.0 m s^{-1} (b) 风速 5.0 m s^{-1} 图1 降雨强度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 不同风速条件下坡面降雨动能随坡向的分布

Fig. 1 Distribution of the kinetic energy with the inclination of the soil surface under different wind velocity when the rain drop is $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

3 问题与讨论

传统的关于降雨强度、风矢量、降雨动能分布之间关系的经验统计学研究方法能使问题变得简单易解,但缺点是降雨动能分布与风矢量关系的物理机制不够明确,加上海拔高度、大气环流背景、下垫面状况等因素存在明显的时空分布差异,导致各种经验模型的适用范围受到严格限制,且不同模型之间不易进行比较。本文中对坡面降雨动能分布的研究综合考虑了风向、风速、降雨强度、坡向坡度等诸多因素的影响,可为坡面降雨侵蚀规律研究提供参考。

研究结果表明,风向与风速对坡面降雨总动能分布的影响极大。文中的结论系根据雨滴速度的分布律推导得出的,虽有坚实的物理基础,但尚待大量可靠的实验数据验证。式(5)虽然给出了坡面降雨动能的分布密度,但由于密度函数的取值受风向、风速、降雨强度、坡向坡度等诸多因素的影响,因此很难通过式(6)得到降雨动能的均值和方差的解析表达式。可能的解决办法是,采用蒙特-卡洛方法,直接对雨滴速度的分布进行模拟试验研究,获得风矢量影响下的垂直于坡面的雨滴速度的经验分布,进而获得坡面降雨动能的经验分布,并由此得到降雨动能的均值与方差。然而这一步的实现,涉及到 v_1^* 和 v_2^* 的联合分布,须做进一步的研究。

参 考 文 献

[1] 周佩华,斗葆璋,孙清芳,等. 降雨能量的试验研究初

报[J]. 水土保持通报,1981(1):51~60

- [2] 江忠善,宋文经,李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持,1983(3):32~36
- [3] Wishmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1958(39):285~291
- [4] Salles C, Poesen J, Semperé-Torres D. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity [J]. Journal of Hydrology, 2002,257(1-4):256~270
- [5] Disrud L A. Magnitude, probability and effect of kinetic energy of winds associated with rains in Kansas [J]. Kansas Academy of Science, 1970(73):237~246
- [6] Lima-de J L M P. The effect of oblique rain on inclined surfaces: a monograph for the rain gauge correction factor [J]. Journal of Hydrology,1990,155:407~412
- [7] Pedersen H S, Hasholt B. Influence of wind speed on rain splash erosion[J]. Catena, 1995(24):39~54
- [8] Helming K. Wind speed effects on rain erosivity[A]. In: Stott D E, mohtar R H, Steinhardt G C. Sustaining the global farm [C]. West Lafayette: Purdue University, 2001.771~776
- [9] 陈永宗,景可,蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京:科学出版社,1992.42
- [10] 钱允祺,陶士珩. 黄土高原降雨雨滴最终速度的分布律[J]. 西北农业大学学报,1998,26(6):20~24
- [11] 牟金泽. 雨滴速度计算公式[J]. 中国水土保持,1983(3):40~41