

# 单雨滴降落速度变化数值模拟

郭慧杰<sup>1</sup>, 孙三祥<sup>1,2</sup>, 王文<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为了有效分析雨滴终速对土壤的溅蚀作用, 利用 Ansys/Fluent 软件和 VOF 模型对雨滴进行自由跟踪, 结合雨滴和薄层水混合模拟分析了雨滴降落过程中的速度变化和雨滴降落到水面的速度、雨滴直径和降落高度的关系, 根据相关文献资料验证了模拟结果。结果表明: 雨滴以相同直径下落时, 随高度的增大, 雨滴入水直径总体呈变小趋势, 降落高度为 15~20 m 时, 雨滴直径减小到原来的 40%; 在相同高度的条件下, 随着雨滴直径的增大, 雨滴入水直径呈增大趋势, 当雨滴初始直径由 3 mm 增大至 4 mm 时, 则入水雨滴直径增大 20%; 雨滴直径在 2~4 mm 范围内, 当水层厚度达到 2.5 cm 时, 雨滴的打击力消失。

**关键词:** 雨滴降落; VOF; Ansys/Fluent; 单雨滴; 雨滴直径

中图分类号: P426.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)02-0257-04

## Numerical simulation of single raindrop landing speed change

GUO Huijie<sup>1</sup>, SUN Sanxiang<sup>1,2</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>

(1. Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Engineering Research Centre of Water Resource Utilization in Cold and Drought Region of Ministry of Education, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to effectively analyze the effect of terminal velocity of raindrops on soil erosion, the Ansys/Fluent software and VOF model were used to track raindrops freely, and the simulation of mixing rain and thin layer of water was conducted to analyze velocity changes of raindrops and the connection between velocity, raindrops diameter and height when raindrops fall to the surface of the water. The simulation results were verified based on relevant literature data. Results show that when the raindrops fall with a same diameter, along with the increase of height, the diameter of raindrops entering the water showed a trend of decrease, decreasing from the diameter of 15 m to 20 m to 40% of the original diameter. Under the condition of the same height, with the increase of diameter, the diameter of raindrops entering the water showed a trend of increase, increasing by 20% from diameter of 3 mm to 4 mm. When raindrops diameter was within 2 mm to 4 mm, and water layer thickness was 2.5 cm, raindrops hitting power disappeared.

**Key words:** raindrops landed; VOF; Ansys /Fluent; single raindrop; diameter of raindrop

## 1 研究背景

国内外学者利用不同方法针对雨滴降落速度受不同因素的影响进行了研究。禹见达等<sup>[1]</sup>采用风雨天平进行了模拟降雨条件下的降雨冲击力测量, 当雨滴超过一定高度时, 其冲击力与单位时间降雨量、降雨高度无关, 意味着雨滴终速趋于定值; 董蓉等<sup>[2]</sup>提出了基于视频图像检测雨滴的方法; 王文瀚

等<sup>[3]</sup>基于演示试验, 提出基于光电检测进行雨滴谱参数测量; 王建国等<sup>[4]</sup>对雨滴降落终速进行了量纲分析; 宋云超等<sup>[5]</sup>认为撞击速度和压力是形成雨滴不同形态的重要因素, 不同的速度分布特性是产生气泡的主要原因; 李大树等<sup>[6]</sup>认为雨滴撞击水面时依次出现表面震荡、铺展、雨滴飞溅、收缩和回弹射流现象; 此外, 对雨滴在降落过程中空气中的影响因素<sup>[7-12]</sup>以及测量技术与设备<sup>[13-16]</sup>等进行了多方面

收稿日期: 2017-12-06; 修回日期: 2018-03-24

作者简介: 郭慧杰(1990-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事工作和研究方向: 流体力学。

通讯作者: 孙三祥(1965-), 男, 甘肃兰州人, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要从事计算流体力学研究。

的研究。

目前基于 VOF 模型,考虑液-气耦合的两相流的模拟研究成果较少。本文利用 Ansys/Fluent 软件,基于 VOF 模型,对雨滴进行自由跟踪,分析雨滴降落过程中的速度变化,雨滴降落到水面时的速度、雨滴直径和降落高度的关系,确定雨滴终速对液面平面型态的影响。

## 2 研究方法 with 模型建立

### 2.1 基本假设

以雨滴为研究对象,雨滴下落过程中影响因素较多,假设:

- (1) 雨滴下落过程中和空气组成一个系统,不考虑风速的影响和气体的融入;
- (2) 雨滴落入水中时不考虑雨滴的表面张力;
- (3) 雨滴下落时不考虑雨滴间的相互影响;
- (4) 雨滴为不可压缩液体。

### 2.2 模型方程

采用基于 Geo-Reconstruct 方程的跟踪模型,选取 VOF 标准模型使方程组封闭。雨滴降落及雨滴与水层碰撞的控制方程有质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程。

控制方程:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\alpha t} + \nabla(\rho U\varphi) = \nabla(\lambda_{\varphi} \nabla\varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为密度, kg/L;  $t$  为时间, s;  $\varphi$  为通用变量, 可代表  $u, v, \omega, k, \varepsilon$  变量;  $U$  为速度矢量。

### 2.3 水气两相流的 VOF 模型

VOF 法最早由 Hirt 等<sup>[17]</sup>提出,已被广泛运用于自由问题。目前已由最初的 VOF 法进而发展出多种 VOF 类的方法。VOF 模型通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分来模拟两种或者 3 种不能混合的流体<sup>[18]</sup>。VOF 模型的控制方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial\rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_i) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为密度, kg/m<sup>3</sup>;  $p$  为修正压力, Pa;  $\mu$  为分子动力黏度, Pa·s;  $u_i, u_j$  分别为速度在  $i, j$  方向上的分

量。

### 2.4 模型建立

2.4.1 物理模型 选取 25 m 高, 10 m 宽, 建立雨滴降落二维几何模型, 模拟不同降雨高度 (10、15、20 m) 和不同直径 (2、3、4 mm) 雨滴降落过程。采用四边形网格, 网格大小为 0.5 mm × 0.5 mm, 网格总数为 13 731 个, 并进行网格无关性验证, 确保模拟结果与网格数量无关。

2.4.2 边界条件 雨滴边界条件: 雨滴的边界设置为动网格 (dong-w)。

参数设置: 重力加速度取值为 9.81 m/s<sup>2</sup>, 水的密度取值为 1.0 kg/L, 环境温度 20℃。

2.4.3 求解方法 采用主要用于不可压缩流动的压力基隐式求解, 黏性模型采用标准形式的 VOF 模型, 为提高计算精度, 离散格式采用二阶迎风格式。采用非稳态的分离式算法中的压力修正法。模型底部的水面采用介质的导入, 各相关参数松弛因子设为 0.5, 设置参数收敛准则为  $1 \times 10^{-4}$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 模拟验证

对文献[19]雨滴降落高度为 10 m 的试验进行数值模拟验证, 验证结果如表 1 所示。

表 1 数值模拟与文献[19]试验数据比较

雨滴直径/ mm	终速/(m·s <sup>-1</sup> )		误差/ %
	文献[19]试验数据	数值模拟数据	
2	6.49	7.2	10.94
3	8.02	9.8	22.19
4	8.83	10.6	20.04

由表 1 可知, 模拟结果比文献[19]试验数据偏大约 10% ~ 23%, 在模拟中只有表面张力和液滴与液滴之间的作用力无法准确得到而未设置, 误差产生的主要原因可能是表面张力和液滴与液滴之间的作用力。

### 3.2 雨滴入水后流速的变化

考虑不同直径雨滴降落到水面有相同的变化趋势, 以直径为 3 mm 为例, 模拟雨滴入水后流速的变化及瞬态响应, 其结果见图 1、2。

图 1 为雨滴落入水中的速度矢量图, 此图截取的是雨滴刚落入水中的速度分布。由图 1 可看出: 雨滴落入薄层水体后垂向速度逐渐减小, 由于击溅作用形成了扰动波, 使得薄层水在流动方向产生速

度变化,且波外侧的速度最大,离波较远的部位速度最小;雨滴与水层接触后流速逐渐衰减,最终恢复到初始速度。在相同水层厚度下,终速越大,则落入水中的打击力越大;不同水层厚度下,随着水层厚度的增大,其受到的打击力逐渐减小;当水层厚度达到 2.5 cm 时,雨滴速度衰减至初始速度。

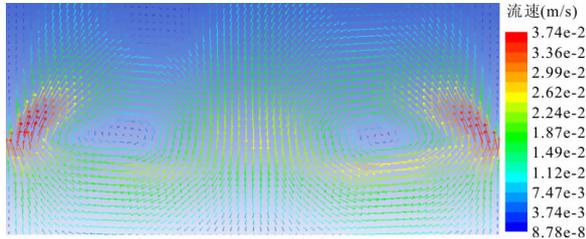


图 1 雨滴落入水中的速度矢量图

图 2 为雨滴落入薄层水流中的瞬态响应图。此图主要选取了雨滴降落到薄层水流中的一次波 P(A)、二次波 P(B)和三次波 P(C),可以得出:雨滴

降落到水中的瞬态响应非常明显且随时间变化迅速,雨滴落入水中的瞬态响应导致水面形成周期性波动,随着雨滴完全融入水中,波动的波峰也慢慢减小,最终液面恢复到初始状态,雨滴的打击力也随压力而变化。

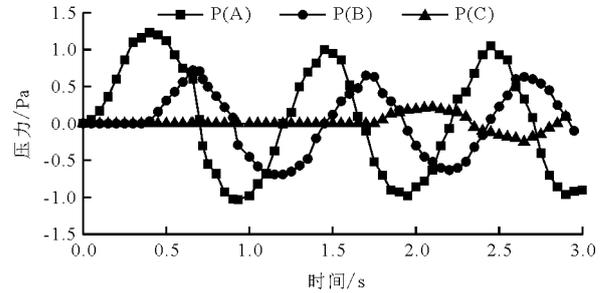
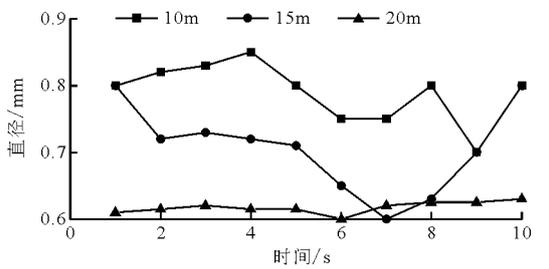


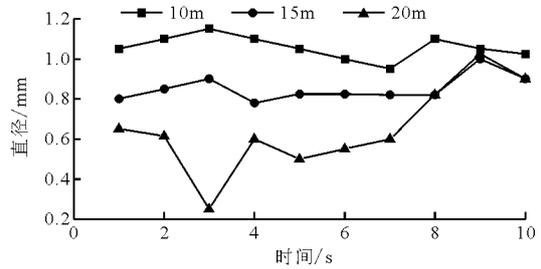
图 2 雨滴落入薄层水流中的瞬态响应

### 3.3 雨滴入水直径随高度的变化

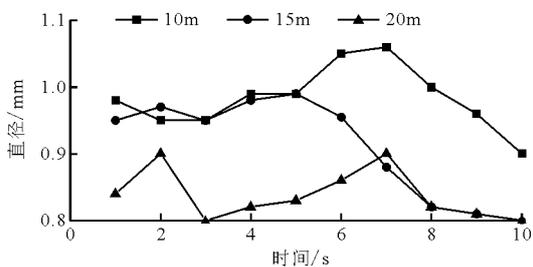
对不同直径、不同高度的雨滴降落过程进行了分析,结果如图 3 所示。



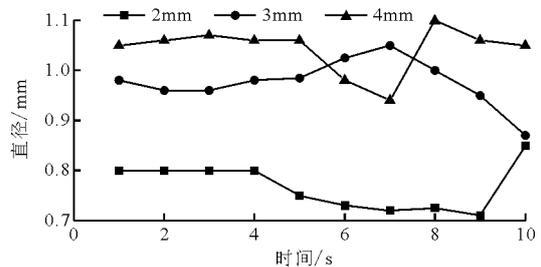
(a) 直径为 2mm 不同高度雨滴直径的变化



(b) 直径为 3mm 不同高度雨滴直径的变化



(c) 直径为 4mm 不同高度雨滴直径的变化



(d) 相同高度不同直径雨滴直径的变化

图 3 不同直径雨滴从不同高度或相同高度降落过程中雨滴直径变化对比

图 3 为不同直径雨滴从不同高度或相同高度降落过程中雨滴直径变化对比。图 3(a~c) 分别反映不同雨滴直径(2、3、4 mm)、不同高度(10、15、20 m)和相同高度不同直径在降落过程中的直径变化。由图 3 可以得出:雨滴下落初始直径相同的情况下,随着降落高度的增大,雨滴入水时直径总体呈变小趋势,且降落高度从 10m 上升到 15m 时,雨滴直径的减小情况比高度从 15 m 上升到 20 m 时雨滴直径

的减小更为明显,降落高度为 15~20 m 的雨滴直径减小到原来的 40%;在降落高度为 10 m 的条件下,随着雨滴初始直径的增大,雨滴入水直径呈增大趋势,当雨滴初始直径由 3 mm 增大至 4 mm 时,其入水直径增大 20%,如图 3(d)。不同降落高度和不同直径的雨滴对落入水中液面的影响起主要的作用,而雨滴的终速是最关键的因素,雨滴直径和雨滴终速的关系如图 4 所示。

图4为不同直径雨滴的终速变化。此图反映不同平均直径的雨滴降落终速,且用经验公式进行了拟合。得出雨滴直径对终速的影响明显,且随着雨滴直径的增大,雨滴的终速增大的越明显且增大到一定直径雨滴的终速就会保持平稳,因此对土壤的侵蚀也有直接的影响。由于雨滴的降落具有相似的降落规律,所以此曲线适合所有的雨滴降落。

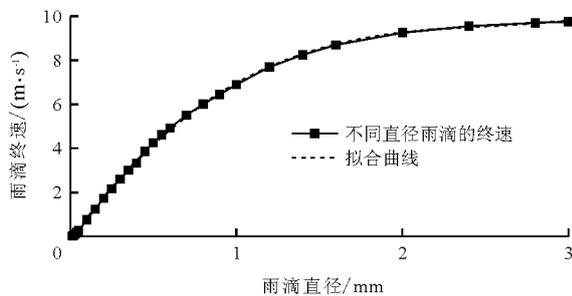


图4 不同直径雨滴的终速与拟合

## 4 结论

根据不同直径、不同降落高度雨滴速度变化及落入薄层水速度、压强变化模拟结果,得出以下结论:

(1)通过对文献试验结果验证,验证了该模拟方法的可行性,且表面张力和雨滴与雨滴之间的作用不可忽略。

(2)雨滴与水层接触后流速衰减。相同水层厚度下,终速越大,落入水中打击力越大,不同水层厚度下,随着水层厚度的增大,其受到的打击力逐渐减小;当水层厚度达到2.5 cm时,雨滴速度衰减至初速度。

(3)雨滴下落初始直径(2、3、4 mm)相同的情况下,随着降落高度的增大,雨滴入水直径总体呈变小趋势,从15~20 m高度降落的雨滴直径减小到原来的40%;在相同降落高度的条件下,随着直径的增大,雨滴入水直径呈增大趋势,雨滴初始直径由3 mm增大至4 mm时,雨滴入水直径增大20%。

### 参考文献:

[1] 禹见达,卿定增,朱兆杰,等. 降雨冲击力试验研究[J]. 工程力学,2015,32(S1):11-14.  
 [2] 董蓉,李勃,陈启美. 一种视频雨滴检测与消除的方法[J]. 自动化学报,2013,39(7):1093-1099.

[3] 王文瀚,凌进中,王力田,等. 光学雨滴谱测量仪[J]. 光学技术,2013,39(3):237-240.  
 [4] 王建国,黄海燕,许利军. 关于雨滴降落终极速度的量纲分析[J]. 河北北方学院学报(自然科学版),2008,24(6):18-20.  
 [5] 宋云超,宁智,孙春华,等. 液滴撞击湿润壁面的运动形态及飞溅运动机制[J]. 力学学报,2013,45(6):833-842.  
 [6] 李大树,仇性启,郑志伟,等. 液滴冲击不同浸润性壁面的数值分析[J]. 农业机械学报,2015,46(7):294-302.  
 [7] 陈文广. 标准雨滴雨强模拟及测试技术[C]//第31届中国气象学会年会 S12 大气物理学与大气环境,大气物理学委员会、北京大学-中国气象局大气水循环和人工影响联合研究中心,2014.6.  
 [8] 张宇,牛生杰,贾星灿. 雨滴下落过程谱分布演变的数值模拟[J]. 大气科学学报,2013,36(6):699-707.  
 [9] 岑家生,王青梅,罗晖,等. 云雨滴边界衍射的理论推导及数值模拟[J]. 激光技术,2011,35(6):837-840+856.  
 [10] 张宇. 雨滴下落过程谱分布演变数值模拟[D]. 南京:南京信息工程大学,2011.  
 [11] 郭志荣,王建豹,王立明,等. 雨滴下落的数值模拟[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版),2010,10(1):46-48.  
 [12] 吕宏兴,武春龙,熊运章,等. 雨滴降落速度的数值模拟[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997(2):14-21.  
 [13] 刘西川,高太长,刘磊,等. 雨滴微物理特征研究及测量技术进展[J]. 地球科学进展,2013,28(11):1217-1226.  
 [14] 谭磊. 黄山地区不同高度雨滴谱特征分析[C]//第33届中国气象学会年会 S12 大气物理学与大气环境,中国气象学会,2016.9.  
 [15] 郭衍灼. 风廓线雷达反演雨滴谱[C]//2009第五届苏皖两省大气探测、环境遥感与电子技术学术研讨会专辑. 江苏省气象学会、安徽省气象学会,2009.4.  
 [16] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1):112-119.  
 [17] 张建明,陈剑刚. 多股多层水平淹没射流新型消能工程—理论与数值模拟研究及工程应用[M]. 北京:科学出版社 2013.12.  
 [18] 占宝剑,水中和,陈伟,等. 基于功效函数法的高性能混凝土配合比优化[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(4):29-32.  
 [19] 韩文霆,曹培,刘文帅. 人工模拟降雨系统喷头喷洒雨滴特性测试[J]. 农业机械学报,2014,45(12):56-61.