

文章编号: 1007-4929(2021)02-0080-07

# 坡地允许喷灌强度计算模型

黄煜<sup>1</sup>, 张林<sup>1,2</sup>, 付博阳<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为了给坡地喷灌系统适宜技术参数的确定提供一定科学依据, 以水文学产流原理为基础, 建立了满足灌水定额条件下的坡地允许喷灌强度计算模型, 并通过试验验证了模型的准确性。应用该模型, 分析了土壤质地、地形坡度和灌水定额对坡地允许喷灌强度的影响。结果表明, 土壤黏粒比越重, 地形坡度越陡, 灌水定额越多, 坡地允许喷灌强度越小, 达到灌水定额所需的灌溉时间越长。综合考虑喷灌系统运行效率和能耗, 当采用雨鸟R5000型喷头进行坡地喷灌时, 建议将黏土的允许喷灌强度控制在0.118 mm/min以内, 而砂土的允许喷灌强度控制在0.461 mm/min以内; 允许喷灌强度可根据坡度进行折减, 建议坡度每升高5%, 允许喷灌强度下降11.69%; 灌水定额大于30 mm时, 允许喷灌强度宜降低50%。

**关键词:** 允许喷灌强度; 坡地喷灌; 土壤水分入渗; 土壤质地; 地形坡度; 灌水定额

**中图分类号:** S275.4 **文献标识码:** A

黄煜, 张林, 付博阳. 坡地允许喷灌强度计算模型[J]. 节水灌溉, 2021(2): 80-86.

HUANG Y, ZHANG L, FU B Y. Calculation model of allowable application rate under sprinkler irrigation on sloping land[J]. Water Saving Irrigation, 2021(2): 80-86.

## Calculation Model of Allowable Application Rate Under Sprinkler Irrigation on Sloping Land

HUANG Yu<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1,2</sup>, FU Bo-yang<sup>1</sup>

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** To provide references for the design of sprinkler irrigation system on sloping land, a mathematical model of allowable application rate was established according to the water balance principle, and its accuracy was experimentally verified. The model was applied to analyze the effects of soil texture, terrain slope and irrigation quota on allowable application rate. The results showed that the higher the soil clay ratio, the steeper the terrain slope, and the more irrigation quota, the smaller the allowable application rate, and the longer the irrigation time. Considering the operation efficiency and energy consumption of sprinkler irrigation system, it is suggested that the allowable application rate of clay and sand should be controlled within 0.118 mm/min and 0.461 mm/min, respectively. The allowable application rate should be reduced by 11.69% for every 5% increase of slope, and it should be decreased by 50% when the irrigation quota is greater than 30 mm.

**Key words:** allowable application rate; sprinkler irrigation on sloping land; soil water infiltration; soil texture; terrain slope; irrigation quota

## 0 引言

允许喷灌强度是坡地喷灌系统设计的一个重要指标, 对某一种土壤来说, 它是一种最大可能的喷灌强度。当用这一

喷灌强度进行喷灌时, 全部喷洒水量都能均匀地渗入土壤中, 地表几乎不产生径流, 也不致破坏土壤结构<sup>[1-7]</sup>。

许多学者对平地允许喷灌强度进行了研究。Silva等<sup>[8, 9]</sup>发现, 允许喷灌强度与土壤入渗息息相关, 要求喷灌水量立即

收稿日期: 2020-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779246)。

作者简介: 黄煜(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: sifmol@163.com。

通讯作者: 张林(1981-), 男, 副研究员, 博士生导师, 主要从事节水农业和水土资源高效利用研究。E-mail: zl0211wy@163.com。

入渗而不产生径流，则在灌溉时间内喷灌强度应始终低于土壤入渗速率。Kostiakov<sup>[10]</sup>得出，喷灌强度在0.10~0.15mm/min时，土壤的结构和通气性不会遭到破坏，喷灌强度越大则对土壤结构的破坏越严重。伊尔霍夫<sup>[11]</sup>在黑钙土上进行了试验，认为喷灌由于土壤表面没有水层，所以属无压入渗，引出了土壤无压入渗指标，并得出了地面出现水洼和开始产流之前，喷灌水层深度与喷灌强度的关系。Kretinina<sup>[12]</sup>研究了喷灌对栗钙土的影响，结果表明当雨滴粒径相同时，随着喷灌强度的增大，地表出现水洼的时间将缩短；喷灌强度一定，雨滴粒径越小，出现水洼的时间将延长。以上试验均对平地允许喷灌强度确定提供了指导，但平地与坡地不同，若喷灌强度不合适，坡地比平地更易积水，形成地表径流，造成水资源浪费和水土流失。

蒋定生等<sup>[13]</sup>通过坡地降雨对入渗影响的模拟试验，得出土壤稳定入渗速率随着坡度增加而减小这一规律。黄明斌<sup>[14]</sup>分析了坡地单元降雨产流，发现土壤平均入渗速率随坡度的增加呈指数曲线下降。辛伟<sup>[15]</sup>等对坡地产流产沙进行了模拟试验，结果表明地表径流累积量与雨强、坡度均成正比关系，壤中流累积量随着坡度和雨强的增大而减小。Cisneros等<sup>[16-18]</sup>研究了坡度对允许喷灌强度的影响，指出允许喷灌强度与地形坡度有关，并随着坡度的增大而减小。由以上研究可知，坡地的土壤入渗速率将随坡度增加而减小，采用与平地相同的喷灌强度在坡地灌溉时，将更早产流，径流量也越多，因此，相对于平地，坡地的允许喷灌强度将更小。

为使每次的喷灌水量达到设计灌水定额的要求，传统的允许喷灌强度确定方法多采用以土壤的稳定入渗速率作为喷灌强度的上限，此方法虽较合理，但以土壤稳定入渗速率作为上限偏于保守，尤其对于土壤稳定入渗速率较低坡地来说，将导致单次灌溉时间过长，系统运行效率较低，能耗、成本提高。

因此，为了给坡地喷灌提供一种适宜且高效的允许喷灌强度计算方法，本文基于水文学产流原理，通过求解土壤入渗速率与灌水定额和喷灌强度的关系，建立了坡地允许喷灌强度计算模型，利用模型研究了土壤类型、地形坡度、灌水定额对允许喷灌强度的影响，为解决坡地喷灌灌溉质量低和水利用率不高等问题提供了一定参考，也为喷灌系统的设计和喷灌技术在坡地大面积推广应用奠定一定基础。

## 1 坡地允许喷灌强度计算模型构建

### 1.1 模型构建方法

允许喷灌强度是一种最大可能的喷灌强度，根据水文学产流原理，在某一时刻喷灌强度大于土壤水分入渗速率时，水分来不及入渗，将开始产流，这在实际喷灌应用中是不可取的。因此，在灌溉期间，喷灌强度应始终小于土壤水分入渗速率，才能使水分都能均匀渗入土壤而不产生地表径流。

当以喷灌强度等于或低于土壤稳定入渗速率 $f_s$ 进行灌溉，虽能保证不产流，但会导致每次喷灌时间延长，效率较低，达不到最优目的，适宜的喷灌强度应介于稳定入渗速率与最大入渗速率之间。为了更好的确定较优的允许喷灌强度及每

次的喷洒时间，应该既考虑土壤的入渗能力又考虑灌溉要求。因此，为使坡地喷灌不产生径流，节约水资源，又要水分充分入渗，满足作物需求。则必须满足：

$$f_s < P \leq f < f_m \quad (1)$$

$$I = P t = m \quad (2)$$

式中： $P$ 为喷灌强度，mm/h； $f$ 为某时刻入渗能力，mm/h； $f_s$ 为土壤稳定入渗速率，mm/h； $f_m$ 为土壤最大入渗能力，mm/h； $I$ 为喷灌总入渗水量，mm； $t$ 为喷灌时间，min； $m$ 为设计灌水定额，mm。

为了对以上方程进行求解，应将允许喷灌强度与土壤水分入渗速率和灌水定额相结合。图1给出了坡地喷灌条件下，土壤水分入渗能力曲线与允许喷灌强度 $P_a$ 关系曲线。

当喷头以喷灌强度 $P_a$ 进行灌溉，在 $0 \sim t_1$ 时间内，喷灌强度 $P_a \leq$ 土壤水分入渗速率 $f$ ，喷灌水分全部入渗而不会产生径流。当时间到达 $t_2$ ，即图1中上下两块阴影部分面积相同时，此时灌溉量( $m = P_a t_2$ )与喷灌入渗总水量 $I$ 相等( $I$ 为 $0 \sim t_1$ 时间内入渗曲线与两坐标轴围成的面积)，且喷灌强度大于土壤水分入渗速率，地面即将开始产流。此时的喷灌强度即为允许喷灌强度，其值 $P_a = f_1$  ( $f_1$ 是入渗曲线上对应时刻 $t_1$ 的入渗速率)， $t_2$ 为满足灌水定额 $m$ 条件下，允许喷灌强度的灌溉时间。

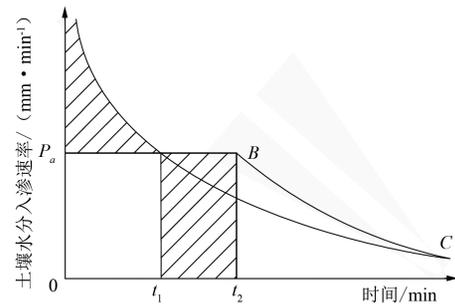


图1 土壤水分入渗曲线与允许喷灌强度

Fig.1 Relationship between infiltration curve and allowable application rate

Philip入渗模型因具有明确的物理意义和较高的土壤水分入渗拟合精度被广泛应用于坡地入渗<sup>[19-22]</sup>，因此，坡地土壤水分入渗能力曲线可以采用Philip公式来表示：

$$f(t) = \frac{1}{2} S t^{-\frac{1}{2}} + A \quad (3)$$

式中： $f(t)$ 为某一时刻入渗速率，mm/min； $S$ 为吸渗率，mm/min<sup>0.5</sup>； $A$ 为土壤达到饱和时的入渗速率，mm/min。

要求喷灌不产流且满足灌溉定额，则有：

$$P_a = f_1 = \frac{1}{2} S t_1^{-\frac{1}{2}} + A \quad (4)$$

$$P_a t_2 = I = \int_0^{t_1} (\frac{1}{2} S t^{-\frac{1}{2}} + A) dt \quad (5)$$

$$I = P_a t_2 = m \quad (6)$$

由公式(4)~(6)可解出：

$$P_a = A + \frac{S^2}{4m} (1 \pm \sqrt{1 + \frac{4mA}{S^2}}) \quad (7)$$

当式(7)取减号时， $(1 - \sqrt{1 + \frac{4mA}{S^2}}) < 0$ ， $\frac{S^2}{4m} (1 -$

$\sqrt{1 + \frac{4mA}{S^2}} < 0$ ,  $P_a < A = f_c$ , 不满足  $f_c < P_a < f_m$  要求。因此由公式 (4) ~ (6) 可得:

$$P_a = A + \frac{S^2}{4m} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4mA}{S^2}} \right) \quad (8)$$

$$t_2 = \frac{m}{A + \frac{S^2}{4m} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4mA}{S^2}} \right)} \quad (9)$$

## 1.2 模型参数确定

### 1.2.1 设计灌水定额 $m$

灌水定额  $m$  根据作物实际需水要求以及灌溉时土壤水分情况进行设定确定, 可采用式 (10) 进行计算:

$$m = 0.1H(Q_{\max} - Q_{\min})/\eta \quad (10)$$

式中:  $H$  为作物土壤计划湿润层厚度, cm;  $Q_{\max}$  为灌溉后土层的含水量上限, 相当于田间持水量,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $Q_{\min}$  为灌溉前土层含水量下限, 约为田间持水量的 60%~70%,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\eta$  为喷洒水有效利用系数。

### 1.2.2 土壤稳定入渗速率 $A$ 和土壤吸渗率 $S$

参数  $A$  和  $S$  可通过求解坡地喷灌土壤入渗能力曲线得到, 但要获得各种实测情况下的土壤水分入渗能力曲线工作量较大且较为困难。考虑到 Philip 模型为 Richards 方程<sup>[23]</sup>的解析解, 且坡地喷灌时, 喷灌水分进入土壤, 主要在基质势和重力势的共同作用下运移, 其水分运动符合达西定律, 因此可采用 Richards 方程来模拟坡地喷灌土壤水分运动, 通过求解 Richards 方程来推求不同条件下土壤稳定入渗速率  $A$  和土壤吸渗率  $S$ 。

假设土壤均质且各向同性, 忽略温度对土壤水分运动的影响, 不考虑土壤水分滞后效应, 坡地喷灌土壤水分运动可以采用 Richards 方程描述:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left( xK(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (11)$$

式中:  $\theta$  为体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $t$  为时间, min;  $h$  为土壤压力水头, cm;  $z$  和  $x$  为垂直与水平坐标, cm;  $K(h)$  为导水率, mm/min。

土壤含水率  $\theta$  及导水率  $K(h)$  可由 vanGenuchten-Mualem<sup>[24, 25]</sup> 公式表示:

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + \frac{-\theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$K(h) = K_s S_e^{0.5} \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^2 \right] \quad (13)$$

式中:  $\theta_s$  为饱和含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_r$  为残余含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  和  $l$  为经验参数,  $m=1-1/n$ ,  $K_s$  为饱和导水率, mm/min;  $S_e$  为相对饱和度,  $S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ 。

坡地喷灌中 Richards 方程的定解条件为:

(1) 边界条件。图2给出了坡地喷灌条件下, 坡地纵断面网格划分和边界条件示意图, 如图2所示, 可将坡地纵断面简化为  $ABCD$  所围成的梯形, 其地形坡度可以表示为:

$$\tan \beta = \frac{|AD| - |BC|}{|CD|} \quad (14)$$

式中:  $|AD|$ 、 $|BC|$  和  $|CD|$  为  $AD$ 、 $BC$  和  $CD$  边的长度, m。

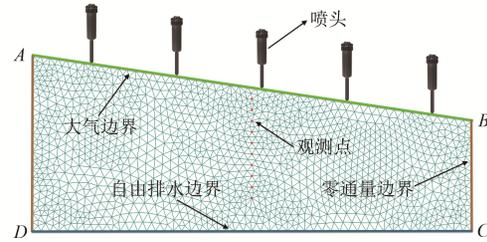


图2 模拟求解区域示意图

Fig.2 Flow domain defined in simulation

上边界  $AB$  为定通量边界, 忽略地表水分蒸发, 其水分通量为坡面平均喷灌强度:

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) = \frac{1}{60} p(\beta) \quad (15)$$

$$(0 \leq x \leq |CD|, z = -\tan \beta + |AD|)$$

式中:  $p(\beta)$  为坡面平均喷灌强度, mm/h; 其值可通过实测手段获得, 也可通过前人提出的坡地喷灌水量分布数学模型计算<sup>[26-28]</sup>。

左、右边界  $AD$  和  $BC$  均设定为零通量边界:

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (x = 0 \text{ 或 } x = |CD|, 0 \leq z \leq -\tan \beta + |AD|) \quad (16)$$

下边界  $CD$  为自由排水边界:

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) = 0 \quad (0 \leq x \leq |CD|, z = 0) \quad (17)$$

(2) 初始条件。假定模拟区域的土壤初始含水率均匀分布且满足:

$$\theta(x, z, t) = \theta_0(x, z, 0) \quad (0 \leq x \leq |CD|, 0 \leq z \leq -\tan \beta + |AD|, t = 0) \quad (18)$$

式中:  $\theta_0(x, z, 0)$  为土壤初始含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。

(3) 求解参数方法。采用 HYDRUS-2D 软件对坡地喷灌条件下的 Richards 方程进行求解, 求解区域采用三角形为单元进行划分, 节点之间的距离为 2 cm。计算初始步长为 0.1 min, 最小和最大步长分别为 0.01 min 和 0.1 min。吸渗率  $S$  和土壤稳定入渗速率  $A$ , 可通过 Philip 公式对所得的土壤入渗能力曲线进行拟合得到。

## 2 模型的试验验证

### 2.1 试验材料与方法

坡地喷灌土壤水分入渗试验在西北农林科技大学旱区节水农业研究院灌溉水力学试验厅进行, 室内无风。试验装置由喷头、压力传感器、恒压变频供水控制柜、不锈钢水箱、土箱、电子秤、不锈钢支架以及其他必需的试验设备等组成。测试喷头选用灌溉中常见的雨鸟 R5000 喷头, 喷嘴直径为 3.0 mm, 喷射仰角为 10°, 工作压力范围为 170~450 kPa。为了防止喷头喷洒出的水滴四处乱溅, 损坏其他试验设备, 在喷头周围安装一道弧形挡水薄膜。压力传感器为西安新敏 CYB 型 (量程 0~500 kPa, 精度 0.1%), 将其安装在喷头进口处, 并用防水塑料袋包裹。

由于在野外进行坡地喷灌土壤水分测定比较困难，为了便于试验，可在室内利用若干个独立土箱的土壤水分入渗情况来模拟坡地的土壤水分入渗。通过改变土箱与喷头的相对高差、水平距离以形成试验所需的地形坡度。本次试验采用3个土箱来验证坡地喷灌条件下土壤水分入渗情况，试验前，将3个土箱分别放置离喷头水平距离1、5和10 m处的不锈钢支架上，根据试验坡度，计算喷头和土箱高程，通过改变不锈钢支架高度，使土箱表面与喷头处于同一坡面。为了便于观测土壤水分入渗变化，土箱均采用透明有机玻璃加工而成。土箱横截面宽度为0.3 m，纵截面形状为直角梯形，以便根据坡度将土壤填充成倾斜面，其上底、下底和高的尺寸分别为0.3 m×0.45 m×0.3 m。试验用土为过2 mm筛、晒干的黏壤土，其中黏粒含量31.6%，粉粒34.9%，砂粒33.5%，初始含水率为0.10 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>，土壤水分特征参数见表1。以每5 cm一层，按容重1.3 g/cm<sup>3</sup>将土壤人工压实装入土箱，并根据坡度调节土壤表面倾斜度，使其与坡度一致。在距土壤表面4.5、12.0、19.5和27.0 cm处，分别布置1个EM50土壤水分传感器，每隔2 min获取一次土壤含水率；电子秤（量程为0~200 kg，精度为20 g）置于土箱下，每间隔10 min记录一次土壤水分累积入渗量；记录产流时间。

表1 土壤水分特征参数

Tab.1 Hydraulic parameters of soil

土壤类型	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha / \text{cm}^{-1}$	$n$	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	$l$
黏壤土	0.084	0.480	0.011	1.465	0.011	0.500

坡地喷灌持续时间为3 h；试验坡度为15%；为了使喷头在正常压力范围内运行，喷头测试工作压力设为300 kPa，试验前，通过调节恒压变频供水控制柜，获得喷头所需试验工作压力，待压力稳定后，即可开始测试。

### 2.2 统计分析指标

采用平均相对误差（MRE）、均方根误差（RMSE）及决定系数R<sup>2</sup>，对模拟值与实测值之间的符合度进行统计分析，MRE绝对值小于0.15代表模型具有较好的适用性，RMSE越接近0，R<sup>2</sup>越接近1，模拟效果越好。

### 2.3 模拟值与实测值对比分析

对坡地喷灌土壤水分入渗曲线（模拟与实测的土壤稳定入渗速率A和土壤吸渗率S）、土壤累积入渗量（I）和灌溉总量（m）以及喷灌强度P和满足一定灌水定额的允许喷灌强度P<sub>a</sub>进行了对比分析。图3给出了坡地喷灌土壤水分入渗速率随时间变化的模拟值与实测值对比情况。从图3可以看出，模拟与实测的土壤水分入渗速率随时间具有一致的变化规律，均随时间的增加而呈幂函数减小。对土壤水分入渗速率在各时间的模拟值与实测值进行统计分析，结果显示模拟与实测的MRE绝对值为0.046，RMSE值为0.036，R<sup>2</sup>大于0.913；实测的土壤稳定入渗速率A为2.231 mm/min，土壤吸渗率S为0.155 mm/min<sup>0.5</sup>；模拟的土壤稳定入渗速率A为2.010 mm/min，土壤吸渗率S为0.162 mm/min<sup>0.5</sup>，相对误差分别仅有11.01%和4.32%。在试验过程中，实测喷灌开始产流的时间t<sub>2</sub>为58 min，

此时的土壤水分累积入渗量I等于灌水量m，为20.3 mm；模拟的开始产流时间t<sub>2</sub>为61 min，模拟的累积入渗量I等于灌水量m，为20.0 mm；通过上述模型计算，在灌水定额为20 mm时，坡地喷灌的允许喷灌强度为0.33 mm/min，其值与喷灌强度0.35 mm/min非常接近。由此说明，坡地喷灌允许喷灌强度计算模型的模拟值与实测值之间差异较小，表明模型可用于推求不同工作条件下坡地的允许喷灌强度。

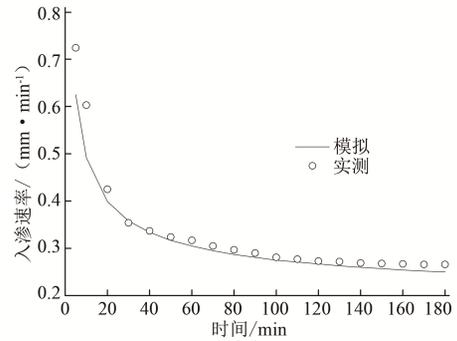


图3 模拟与实测的土壤水分入渗速率

Fig.3 Infiltration rate between simulated and measured values

## 3 模型应用

应用上述构建的坡地允许喷灌强度计算模型，研究了土壤类型、地形坡度及灌水定额对坡地允许喷灌强度影响。模拟因素和水平如表所示，模拟喷灌时间均为3 h。

表2 模拟因素及水平

Tab.2 Experimental factors and levels for simulation

土壤质地	坡度/%	灌水定额/mm
砂土	0	10
砂壤土	5	20
壤土	10	30
黏壤土	15	40
黏土	20	50
-	25	60

### 3.1 土壤质地对允许喷灌强度影响

本次试验共选取5种土壤，分别为砂土、砂壤土、壤土、黏壤土和黏土，土壤水分特性参数如表3所示，土壤初始含水率均为0.20 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。

表3 土壤水分特性参数

Tab.3 Hydraulic parameters of soil

土壤质地	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha / \text{cm}^{-1}$	$n$	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	$l$
砂土	0.045	0.430	0.145	2.680	29.700	0.5
砂壤土	0.065	0.410	0.075	1.890	4.421	0.5
壤土	0.078	0.430	0.036	1.560	1.040	0.5
黏壤土	0.095	0.410	0.019	1.310	0.260	0.5
黏土	0.068	0.380	0.008	1.090	0.200	0.5

为求土壤稳定入渗速率A和土壤吸渗率S，需对不同土壤质地入渗条件下的土壤水分入渗曲线进行求解，图4给出了坡度为5%时，不同土壤质地的土壤入渗速率随时间变化曲线。不同土壤类型下土壤水分入渗速率随时间的变化较为类

似，均随灌水时间的增加而逐渐减小，但不同土壤类型的土壤入渗速率大小有所不同。入渗速率随时间的变化趋势可分为2个阶段：第1阶段，时间小于40 min，土壤入渗速率随灌水时间的增加迅速减小。其中，砂土入渗速率下降最多，由5 min时的0.854 mm/min下降到0.475 mm/min。黏土入渗速率减少最小，由0.348 mm/min减少到0.170 mm/min；第2阶段，时间大于40min，随着灌水时间的继续增加，入渗速率缓慢减小并逐渐趋于稳定。相同灌水时间下，不同土壤类型的入渗速率由大到小依次为：砂土、砂壤土、壤土、黏壤土、黏土。180 min时各土壤入渗速率分别为0.365、0.247、0.192、0.148、0.119 mm/min，砂土入渗速率最高，约为入渗速率最低黏土的3倍。这主要是因为，由于土壤质地的不同，其各颗粒级配将不同，颗粒级配影响土粒的表面能、土壤孔隙尺度和分布，这会对土壤水分运动的驱动力和水力传导度产生影响，进而影响到土壤水分入渗能力。黏粒的百分比越高，土壤质地越重，土壤颗粒则越细，颗粒之间孔隙越小，颗粒总表面积越大，表面能越高、吸水能力越强，而导水能力减弱。这就导致了重质土壤的入渗速率要低于轻质土壤，且其入渗速率变化相对于轻质土壤更小。

采用 Philip 公式对入渗曲线进行拟合，拟合效果较好。当灌水定额均为 30 mm 时，不同土壤的允许喷灌强度和灌溉时长如表 4 所示。从表可以看出，随土壤质地由轻到重，各土壤的稳定入渗速率  $A$  和吸渗率  $S$  由大变小，允许喷灌强度降低，单次灌溉时间延长。砂土因其土壤颗粒和颗粒之间孔隙较大，导致其颗粒总表面积相对更小，表面能更低、吸水能力更弱，而导水能力增强。砂土的稳定入渗速率最高，为 0.27 mm/min，分别为砂壤土、壤土、黏壤土、黏土的 1.75、2.62、2.87 和

表 4 不同土壤质地允许喷灌强度和灌溉时间表

Tab.4 Allowable application rate and irrigation time under different soil texture

土壤质地	$A/(mm \cdot min^{-1})$	$S/(mm \cdot min^{-0.5})$	$R^2$	允许喷灌强度/( $mm \cdot min^{-1}$ )	灌溉时间/min
砂土	0.267	2.625	0.998	0.461	65.089
砂壤土	0.153	2.513	0.996	0.310	96.883
壤土	0.102	2.422	0.999	0.237	126.638
黏壤土	0.093	1.463	0.997	0.155	193.176
黏土	0.073	1.229	0.984	0.118	253.359

### 3.2 地形坡度对允许喷灌强度影响

由前可知，地形坡度会对土壤水分入渗速率产生影响，为求不同地形坡度下的土壤稳定入渗速率  $A$  和土壤吸渗率  $S$ ，图 5 给出了土壤质地为壤土时，不同地形坡度下土壤入渗速率随时间变化曲线。从图 5 可以看出，不同地形坡度下，土壤水分入渗速率均随灌水时间的增加而减小，最后趋于稳定；地形坡度越大，土壤水分入渗速率在相同时间内入渗速率降幅越多，数值越低。当坡度从 0 增加到 25% 时，土壤入渗速率在前 40 min 分别下降 53.19%、54.40%、55.91%、56.33%、57.48% 和 58.12%；在试验结束时，地形坡度为 0 时的土壤水分入渗速率为 0.215 mm/min，而当坡度增加到 25%，其入渗速率为 0.109 mm/min，仅有前者的 1/2。这主要是因为，土壤的水分入渗受重力势与基质势的共同作用。地形坡度越大，重力势沿坡面方向分力越大，地面滞蓄能力越弱，水分停留在

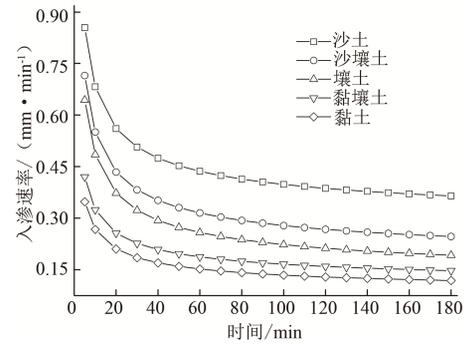


图 4 不同土壤质地土壤入渗速率随时间变化

Fig.4 Infiltration rate under different soil texture

3.66 倍。土壤质地越重，土壤表面能越高，对水分的吸附能力则越强，相同含水率和水势梯度条件下，其水力传导度越小，土壤的吸渗率则越低。黏土的吸渗率为  $1.23 mm/min^{0.5}$ ，仅有砂土、砂壤土、壤土、黏壤土的 46.80%、48.91%、50.71% 和 84.01%。允许喷灌强度受土壤入渗能力影响，由式 (8) 可知允许喷灌强度与土壤的稳定入渗速率和吸渗率呈正相关。土壤稳定入渗速率越高，吸渗率越大，则允许喷灌强度也越大。在各土壤中，砂土的允许喷灌强度最大，为 0.46 mm/min，相同的灌水定额下，喷灌强度越大，灌溉时间就越短，达到灌水定额仅需 65.09 min。对黏土而言，其允许喷灌强度最小，相同灌水定额的灌溉时间最长，为 253.36 min，接近砂土灌溉时间的 4 倍。其他土壤的允许喷灌强度介于砂土与黏土之间，随土壤黏粒百分比的增加而减小。不同土壤质地之间允许喷灌强度差异较大，因此，进行坡地喷灌时，应根据当地的土壤质地，以确定适宜的允许喷灌强度。

坡面相同位置的时间越短，水分入渗越少；而重力势沿垂直坡面方向分力减小，土壤吸收水分能力减弱，这都导致了坡地上水分入渗困难，入渗速率降低。

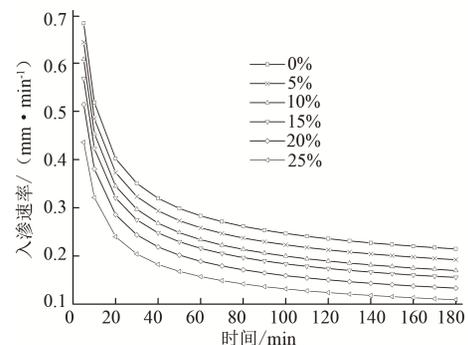


图 5 不同地形坡度下土壤入渗速率随时间变化

Fig.5 Infiltration rate under different slopes

表5给出了土壤质地为壤土，灌溉定额为30 mm时，其Philip模型参数、允许喷灌强度和所需灌溉时间随地形坡度变化表。从表可以看出，随地形坡度增大，土壤的稳定入渗速率、吸渗率和允许喷灌强度均在减小，达到相同灌水定额所需的灌溉时长在增加。壤土的稳定入渗速率下降幅度较大，平地时，壤土的稳定入渗速率为0.121 mm/min，当坡度增加到25%时，入渗速率迅速减小到0.044 mm/min，减少了63.64%；土壤吸渗率的减小幅度相对稳定入渗速率更小，平地时壤土的吸渗率为2.512 mm/min<sup>0.5</sup>，坡度为25%时减小到1.753 mm/min<sup>0.5</sup>，降低了30.21%。这主要

是因为，受地形坡度影响，土壤的入渗能力随地形坡度的增加而降低，使土壤稳定入渗速率减小、水力传导度降低，吸渗率减小，土壤的稳定入渗速率和吸渗率的减小导致了土壤允许喷灌强度的降低。平地时，壤土的允许喷灌强度为0.269 mm/min，坡度为5%、10%、15%、20%和25%的允许喷灌强度相对于平地分别下降11.98%、23.83%、32.42%、44.85%、58.45%，地形坡度平均每增加5%，允许喷灌强度下降11.69%。因此，在实际坡地喷灌时，为确定不同坡度的允许喷灌强度值，可参考平地允许喷灌强度的百分比进行折减。

表5 不同地形坡度允许喷灌强度和灌溉时间表

Tab.5 Allowable application rate and irrigation time under different slope

地形坡度/%	A/(mm·min <sup>-1</sup> )	S/(mm·min <sup>-0.5</sup> )	允许喷灌强度/(mm·min <sup>-1</sup> )	允许喷灌强度降低值/%	灌溉时长/min
0	0.121	2.512	0.269	0	111.473
5	0.102	2.422	0.237	11.98	126.638
10	0.082	2.351	0.205	23.83	146.348
15	0.073	2.212	0.182	32.42	164.939
20	0.057	2.045	0.148	44.85	202.119
25	0.044	1.753	0.112	58.45	268.267

### 3.3 灌水定额对允许喷灌强度影响

根据灌水定额来确定允许喷灌强度能够更高效的将喷水转化为土壤水，为此，研究不同灌水定额条件下的允许喷灌强度具有重要意义。图6为5%坡度，壤土在不同灌水定额下的允许喷灌强度和灌溉时间。如图所示，随着灌水定额的增加，允许喷灌强度呈幂函数减小，灌溉时间呈幂函数增大，拟合公式如下：

$$P_a = 1.236m^{-0.475}, R^2 = 0.989 \quad (19)$$

$$T = 0.810m^{1.475}, R^2 = 0.999 \quad (20)$$

当灌水定额小于30 mm时，允许喷灌强度随灌水定额增加下降较明显。由灌水定额为10 mm时的0.430 mm/min下降到灌水定额30 mm时的0.237 mm/min，约仅有前者的一半。灌水定额大于30 mm时，允许喷灌强度下降速率变缓，相对于灌水定额为30 mm，灌水定额在60 mm时的喷灌强度仅下降23.2%，减小到0.182 mm/min。这是因为，允许喷灌强度与土壤入渗能力有关，随灌水定额即累积入渗量的增加，土壤入渗能力随时间将降低，导致允许喷灌强度降低。此外，由式(9)可知，允许喷灌强度在数值上等于 $t_1$ 时刻的土壤入渗速率，入渗速率随时间呈幂函数降低，允许喷灌强度亦呈幂函数降低，随着灌水定额的增加将最终等于土壤的稳定入渗速率。灌水定额为10 mm时，灌溉需求时长为23.28 min，灌水定额为20~60 mm时，灌溉需求时长呈幂函数增长，分别为其的3.0、5.4、8.1、11.0和14.1倍。这是因为，随灌水定额的增加，允许喷灌强度将减小，达到灌水定额的耗时则增多。因灌水定额为允许喷灌强度与灌溉时间之积，允许喷灌强度呈幂函数降低，灌溉时间则呈幂函数升高。允许喷灌强度并非一成不变，应该根据作物的需水要求来确定允许喷灌强度，灌水定额较大时，应降低允许喷灌强度，以避免径流的产生。

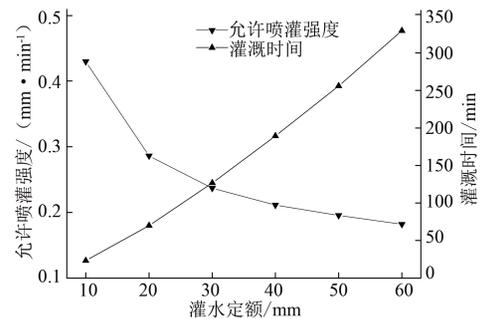


图6 允许喷灌强度和灌水时间随灌水定额变化

Fig.6 Allowable application rate and irrigation time under different Irrigation quota

## 4 结论

(1) 依据水文学产流原理，通过求解土壤入渗能力曲线与灌水定额和喷灌强度的关系，建立了坡地允许喷灌强度模型，通过试验验证了其准确性，模拟结果较准确。

(2) 土壤黏粒比重越大，土壤质地越重，坡地允许喷灌强度越小，达到灌水定额所需的灌溉时间越长。在地形坡度为5%时，砂土的允许喷灌强度为0.461 mm/min，而黏土的允许喷灌强度约仅有砂土的1/4。

(3) 地形坡度越大，允许喷灌强度越小。平地时壤土的允许喷灌强度为0.269 mm/min，且坡度平均每升高5%，允许喷灌强度下降11.69%。

(4) 允许喷灌强度随灌水定额的增加呈幂函数降低，而喷灌所需灌溉时间则呈幂函数增加。当灌水定额小于30 mm时，允许喷灌强度随灌水定额增加下降较明显，约仅有灌水定额为10 mm的50%，当灌水定额大于30 mm时，允许喷灌强度降幅变缓。

## 参考文献:

- [1] 付博阳,惠鑫,任乃望,等.动态水压坡地喷灌水量分布特性与均匀度研究[J].节水灌溉,2019(1):26-31.
- [2] 惠鑫,陈俊英,张林,等.不同竖管布置方式下的坡地喷灌水径分布[J].节水灌溉,2018(7):25-30.
- [3] 焦健,苏德荣.旋转喷盘喷头喷嘴直径对喷盘转速和喷灌强度的影响[J].节水灌溉,2016(8):61-64.
- [4] 刘海军,康跃虎.喷灌动能对土壤入渗和地表径流影响的研究进展[J].灌溉排水,2002(2):71-74.
- [5] 吴崇良.计算允许土壤表面持水量的喷灌强度[J].喷灌技术,1984(1):21-22.
- [6] 金兆森,蒋定生.允许喷灌强度的测定和对我国土壤允许喷灌强度的建议[J].喷灌技术,1980(4):33-41.
- [7] 周勉,羊锦忠,程桂鑫,等.根据土壤入渗能力确定允许喷灌强度的方法[J].江苏农学院学报,1980(3):1-11.
- [8] 蒋定生.土壤入渗能力与许可喷灌强度问题小议[J].喷灌技术,1978(1):8-13.
- [9] SILVA W L C, JAMES L G. Modeling Evaporation and Microclimate Changes in Sprinkle Irrigation: I. Model Formulation and Calibration [J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(5):1 481-1 486.
- [10] SILVA W L C. The effect of spray head sprinklers with different deflector plates on irrigation uniformity, runoff and sediment yield in a Mediterranean soil[J]. Agricultural water management, 2006(85): 243-252.
- [11] KOSTIAKOV A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Transactions of the Sixth Commission of the International Society of Soil Science, 1932,Part A:17-21.
- [12] 伊尔霍夫,蒋定生,唐继尧.喷灌时地面坡度对侵蚀所允许的喷水定额的影响[J].喷灌技术,1981(3):46-49.
- [13] KRETININ T A. Effect of long-term application of fertilizers on the agrophysical properties of an irrigated Light-Chestnut soil[J]. Soviet Soil science, 1990(4):50-58.
- [14] 蒋定生,黄国俊.地面坡度对降水入渗影响的模拟试验[J].水土保持通报,1984(4):10-13.
- [15] 黄明斌,李玉山,康绍忠,等.坡地单元降雨产流分析及平均入渗速率计算[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999(1):3-5.
- [16] 辛伟,朱波,唐家良,等.紫色土丘陵区典型坡地产流及产沙模拟试验研究[J].水土保持通报,2008(2):31-35.
- [17] SOARES A A, WILLARDSON L S, KELLER J. Surface-Slope Effects on Sprinkler Uniformity[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1991, 117(6): 870-880.
- [18] DEBOER D W, CHU S T. Sprinkler technologies, soil infiltration, and runoff[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2001, 127(4):234-239.
- [19] LEHRSCHE G A, KINCAID D C. Sprinkler irrigation effects on infiltration and near-surface unsaturated hydraulic conductivity[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(2):397-404.
- [20] SILVA L L. Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a Mediterranean soil[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1):83-92.
- [21] RAHMATI M, LATORRE B, LASSABATERE L, et al. The relevance of Philip theory to Haverkamp quasi-exact implicit analytical formulation and its uses to predict soil hydraulic properties [J]. Journal of Hydrology, 2019(570):816-826.
- [22] DONG H, ZHAO Y, JIANG X, et al. Boundary effect on the hydraulic characteristics of gravelly soil slopes in physical model tests[J]. Journal of Hydrology, 2019(578):124054.
- [23] MOLLERUP M, HANSEN S. Power series solution for ponded infiltration on sloping surfaces[J]. Journal of Hydrology, 2012(464): 431-437.
- [24] SIMUNEK J. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media[J]. HYDRUS Software, 2005(1):68.
- [25] GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5): 892-898.
- [26] 张林,惠鑫,陈俊英.平地向坡地转换喷灌水量分布计算模型研究[J].农业机械学报,2018,49(7):252-260.
- [27] 张以升,张林,朱德兰,等.基于弹道理论坡地喷灌水量分布模拟及均匀度计算[J].农业工程学报,2016,32(13):59-66.
- [28] ZHANG L, FU B, HUI X, et al. Simplified method for estimating throw radius of rotating sprinklers on sloping land[J]. Irrigation Science, 2018, 36:329-337.