

基于红外视觉的点源土壤入渗性能自动测量方法改进

王伟¹, 程晓磊², 庄晓晖³, 武阳⁴, 卢富运¹, 余方潜¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部农业机械化总站, 北京 100122; 3. 天津农学院水利工程学院, 天津 300392; 4. 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093)

摘要: 土壤入渗性能指标是农业及其他近地表水文等相关研究领域的关键参数, 对其进行快速准确的测量对水资源高效利用具有重要的理论及研究意义。为实现地表有覆盖物时土壤入渗性能的自动精准测量, 该研究提出了一种利用热红外成像技术对点源土壤入渗性能测量方法的改进方案, 设计并构建了对应的测量系统。采用红外热像仪获取地表湿润面积随时间的推进过程, 构建了地表湿润面积提取算法, 定义了土壤入渗性能曲线的形状基函数, 根据水量平衡原理对曲线配位, 并建立了土壤入渗性能模型。室内试验设置了土壤类型(粉壤土和砂壤土)、地表坡度(0°、5°和8°)和覆盖度(20%、40%、50%、60%、65%、70%、75%和80%)3个因素; 在自然植被覆盖条件下进行了田间验证试验。结果表明, 坡度和土壤类型对地表湿润面积识别影响不显著; 当轮廓覆盖度小于60%时, 采用本文的算法, 地表湿润面积识别误差在5%左右, 可满足土壤入渗性能的测量要求。室内及田间入渗性能测量试验的水量平衡误差均在2%以下, 表明土壤入渗性能测量模型精度较高。该研究提出的方法操作方便, 测量精度高, 为实现野外地表有覆盖物的复杂环境下原位测量土壤入渗性能提供了可靠途径。

关键词: 土壤; 入渗; 设计; 红外图像; 点源入渗; 形状基函数; 水量平衡

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305158

中图分类号: S152.7⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-22-0085-09

王伟, 程晓磊, 庄晓晖, 等. 基于红外视觉的点源土壤入渗性能自动测量方法改进[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 85-93. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305158 <http://www.tcsae.org>

WANG Wei, CHENG Xiaolei, ZHUANG Xiaohui, et al. Method improvement for soil infiltrability measurement based on surface wetted area evolution of the point source infiltration monitored by infrared vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(22): 85-93. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305158 <http://www.tcsae.org>

0 引言

入渗是地表水进入土壤的过程。土壤入渗性能直接决定了地表水入渗速率、累计入渗量和地表湿润面积等参数^[1-4]。准确测量土壤入渗性能对调控地表径流、优化水资源利用和提高灌溉水分利用效率具有重要的理论意义和实践价值^[5-9]。

目前, 土壤入渗率测量方法主要包括双环法^[10]、圆盘入渗仪法^[11]、人工模拟降雨法^[12]、产流-入流-积水法^[13]、降雨径流-入流-产流法^[14]、线源入流测量法^[15]等。其中, 双环法是通过测量单位时间内环单位面积的入渗量计算土壤入渗率, 其测量结果较为准确, 但受供水限制很难测得土壤的初始入渗率, 且易形成结皮和破坏表层土壤, 影响测量精度^[10]。圆盘入渗仪法相对双环法需水量少, 但因测量面积较小, 测量值代表性较差, 同时侧渗也影响测量精度^[11]。人工模拟降雨法受降雨强度的限制也无法测得初期较高的入渗率, 增大雨强会加快表层土壤结构的破坏, 影响测量准确性^[12]。产流-入流-积水法对土壤结构影响较小, 测得的土壤入渗率精度较高, 但需要在田间复杂试验环境下人工观测, 测量成本较高^[13]。降雨径流-入流-产流法是对产流-入流-积水测量方法的改进, 减少了

试验过程中的人工观测误差, 测量精度较高, 但试验时必须利用模拟降雨器, 进一步提高了野外测量成本^[14]。

雷廷武等^[15]提出的点、线源入流测量法是目前常用测量土壤入渗性能的方法之一。该方法通过数码相机记录地表湿润面积随时间的推进过程, 再根据水量平衡原理推导土壤入渗率随时间的变化关系。同时, 在试验过程中不破坏土壤的原始结构, 在供水充足条件下可获得土壤的本征入渗性能(自然状态下土壤的入渗性能), 在室内及野外土壤入渗性能测量中均取得了较好的结果; 其中, 采用点源入渗模型, 管瑶等^[16]监测了室内滴灌地表湿润面积和土壤湿润体随时间的变化过程, 并预测了不同流量下垂直入渗深度, 结果误差在8%以内; 孙蓓等^[8]测量了农地耕层与犁底层的入渗过程, 测量误差为5.75%; 刘芳芳等^[9]研究了灌溉水质对盐碱土入渗性能的影响规律。在已有研究中, 受测量原理的限制, 点、线源入流法测量的土壤初始入渗率仍存在较大的误差, 且时间步长严重影响测量精度; 另一方面, 数码相机取像质量受环境影响极大, 当地表有阴影或遮挡物时, 地表湿润面积测量误差较大, 甚至无法测量。

近年来, 红外热成像技术迅速发展^[17], 被广泛应用于农业各领域。红外热像仪可辨识因地表含水量不同导致的辐射差异, 生成清晰的热影像图; 这使地表受遮挡时土壤入渗性能的原位无扰动测量成为可能。针对目前土壤入渗性能测量存在的问题, 本文提出了一种基于红外视觉的点源土壤入渗性能自动测量方法, 采用耦合红外

收稿日期: 2023-05-19 修订日期: 2023-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571257)

作者简介: 王伟, 博士, 副教授, 研究方向为水土保持土壤侵蚀。

Email: weiwang@cau.edu.cn

成像与机器视觉技术^[18]提取地表湿润面积随时间的变化过程；定义形状基函数，确定入渗性能曲线基本形状；根据水量平衡原理对函数曲线配位建立点源入渗模型。设置了对应的试验测量系统，采用室内和田间试验验证地表湿润面积和入渗性能的测量精度，以期为土壤入渗性能的精确测量提供一种可靠的技术手段。

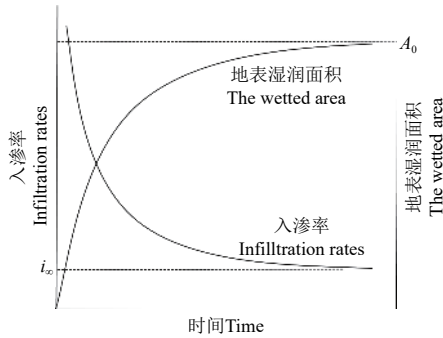
1 测量原理和方法

1.1 测量原理

供水流量恒定时，采用点源入流测得土壤入渗率及地表湿润面积随时间的变化曲线如图1所示^[15]。土壤初始入渗率极大，随时间增加入渗率先快速减小，后趋于稳定值 i_∞ ；对应上述规律，入渗初期地表湿润面积增速较大，随入渗率的逐渐稳定，地表湿润面积也趋于定值 A_0 。地表湿润面积（式1）和土壤入渗率密切相关，通过水量平衡原理，可由地表湿润面积与时间的关系推导出土壤入渗率与时间的关系^[15]。设不同部位的土壤具有相同的入渗性能，通过提取地表湿润面积随时间的变化过程，根据水量平衡原理即可建立土壤入渗率计算模型。

$$A = A_0(1 - e^{-at}) \quad (1)$$

式中 A 为地表湿润面积， mm^2 ； a 为拟合参数， min^{-1} ； t 为时间， min 。



注： A_0 为最大地表湿润面积， mm^2 ； i_∞ 为土壤稳定入渗率， $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。
Note: A_0 refers to the maximum wetted area, mm^2 ; i_∞ refers to stable soil infiltration rate, $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$.

图1 土壤入渗率与地表湿润面积过程示意图

Fig.1 Diagram of the process of soil infiltration vs. the surface wetted area

1.2 入渗模型建立

1.2.1 形状基函数

根据水量平衡原理，任意时刻的土壤入渗率和地表湿润面积与供水流量的关系式^[15]为

$$q = \int_0^A i(A, t) dA \quad (2)$$

式中 q 为恒定供水流量， mm^3/h ； i 为入渗率， mm/h ； A 为地表湿润面积， mm^2 。

在一定的时间间隔内，取入渗率的平均值为 $i(t)$ 的近似值。在 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 时刻提取地表湿润面积，对应地表湿润面积增量为 $\Delta A_1, \Delta A_2, \dots, \Delta A_n$ ，则：

Δt_1 时段水量平衡及 t_1 时刻入渗率 i_1 的近似解为

$$q = i_1 \Delta A_1 \quad (3)$$

$$i_1 = \frac{q}{\Delta A_1} \quad (4)$$

Δt_2 时段水量平衡及 t_2 时刻入渗率的近似解为

$$q = i_2 \Delta A_1 + i_1 \Delta A_2 \quad (5)$$

$$i_2 = i_1 \left(1 - \frac{\Delta A_2}{\Delta A_1}\right) \quad (6)$$

以此类推，各时刻的入渗率都是关于 i_1 和湿润面积增量 ΔA 的函数，定义基函数 I_n ，令

$$I_1 = 1 \quad (7)$$

$$I_2 = 1 - \frac{\Delta A_2}{\Delta A_1} \quad (8)$$

以此类推得到

$$I_n = 1 - \sum_{j=1}^{n-1} I_{n-j} \frac{\Delta A_{j+1}}{\Delta A_1} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

式中 ΔA_n 为第 n 次的湿润面积增量， mm^2 。

基函数 I_n 需要计算各次相邻地表湿润区域面积增量，如果选取特定的时间步长将限制取像时间及数量，无法获得任意时刻的地表湿润面积值。由于初始入渗时土壤湿润面积变化大，采集图像数量过少将导致面积拟合曲线误差增大，从而增加了土壤初始入渗率的测量误差。另外，时间步长选取不同，计算的土壤入渗率差异较大，也会增加基函数的测量误差。

由于测量时每次设置时间步长 Δt 为定值，因此对式(9)中 $\frac{\Delta A_{j+1}}{\Delta A_1}$ 上下同时除以 Δt ，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时得到形状基函数 I'_n 为

$$I'_n = 1 - \sum_{j=1}^{n-1} I'_{n-j} \frac{A'_{j+1}}{A'_1} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

式中 A' 对应某时刻土壤湿润面积随时间变化的一阶导数。

面积变化量受设置的时间步长影响较大，采用上述土壤湿润面积随时间变化的一阶导数表示基函数更为精确。任意时刻的入渗率 i_n 可表示为

$$i_n = i_1 I'_n \quad (11)$$

入渗率 i_n 与形状基函数 I'_n 成倍数关系，其中倍数 i_1 为初始入渗率，形状基函数决定了入渗曲线的形状。为减小时间步长对土壤入渗率的影响，给定比例系数 K 代替 i_1 ，以便后期曲线配位，入渗率 i_n 可变为

$$i_n = K I'_n \quad (12)$$

该方法无需设固定的时间步长，可根据提取的湿润图像变化过程，直接求导得到地表湿润面积对时间的一阶导数，代入式(10)即可得到形状基函数的解析解。该方法解决了取像时必须设置固定的时间步长问题，在入渗前期可提取更多地表湿润区域图像，提高土壤初始入渗率的测量精度。

1.2.2 土壤入渗模型

式(1)中 A_0 和 a 均由地表湿润面积拟合求得，稳定入渗率 i_∞ 及入渗近似解析计算模型^[19]为

$$i_\infty = \frac{q}{A_0} \quad (13)$$

$$i = i_\infty + B e^{-\beta t} \quad (14)$$

式中 B 为待定参数， mm/h ； β 为待定参数， min^{-1} 。

将形状基函数 I'_n 按计算模型形式近似表达为

$$I'_n = a + ke^{-\beta t} \quad (15)$$

式中 a 、 k 、 β 均为拟合参数。

联立式 (12) ~ 式 (15) 得到

$$i = \frac{q}{A_0} + Be^{-\beta t} \quad (16)$$

$$B = \frac{qk}{aA_0} \quad (17)$$

式 (16) 即基于形状基函数建立的土壤入渗模型。

1.2.3 入渗曲线配位

由式 (16) 可知, 拟合参数 β 决定入渗曲线的形状, 而拟合参数 B 决定入渗曲线的位置。根据水量平衡原理, 通过优化拟合参数 B 可对土壤入渗曲线进行位置匹配。

按照地表湿润面积和入渗率关系, 得到理论入渗流量

$$q' = \int_0^A i(t-\tau) dA(\tau) \quad (18)$$

式中 q' 为理论入渗流量, mm^3/h ; τ 为水流到达对应湿润面积的时间, h 。

将式 (1) 和式 (14) 代入式 (18), 积分后得到:

$$q' = i_{\infty} A_0 (1 - e^{-\alpha t}) + \frac{\alpha B A_0}{\alpha - \beta} (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad (19)$$

入渗过程的理论总入渗量 Q_1 为

$$Q_1 = \int_0^t q'(t) dt \quad (20)$$

对上式进行积分, 得:

$$Q_1 = i_{\infty} A_0 t - \frac{i_{\infty} A_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) + \frac{\alpha B A_0}{\beta(\alpha - \beta)} (1 - e^{-\beta t}) - \frac{B A_0}{\alpha - \beta} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (21)$$

供水装置恒定供水流量为 q , 则实际供水量 Q_2 为

$$Q_2 = qt \quad (22)$$

B 作为未知数, 将拟合得到的 A_0 、 α 、 β 和 i_{∞} 值代入式 (21)。根据水量平衡原理, 令 $Q_1 = Q_2$, 化简为

$$\frac{\alpha B A_0}{\beta(\alpha - \beta)} (1 - e^{-\beta t}) - \frac{B A_0}{\alpha - \beta} (1 - e^{-\alpha t}) = qt - i_{\infty} A_0 t + \frac{i_{\infty} A_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (23)$$

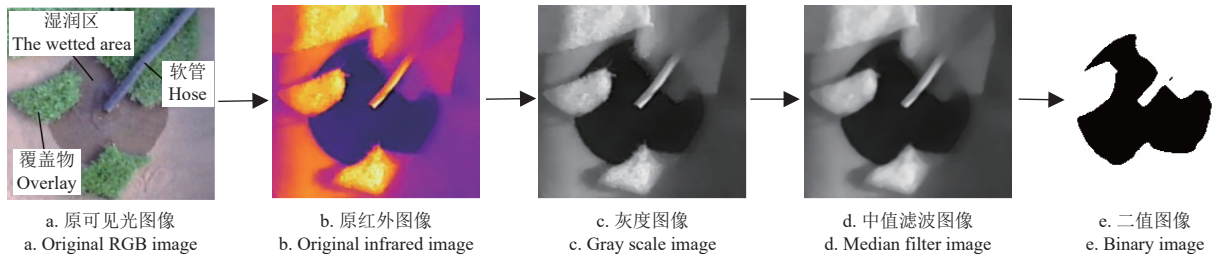


图 3 图像预处理过程示意
Fig.3 Diagram of the procedure of image preprocessing

1.3.3 点源湿润面积计算

本文采用 canny 边缘检测算子^[25] 处理二值图像, 获取图像边缘关键信息; 采用最大连通域算法^[26], 提取湿润区边界轮廓 (图 4a); 采用凸包算法^[27] 获取凸包上的各角点坐标 (图 4b)。点源入渗时湿润体在地表形成较为规则的椭圆面^[28]。设置凸包算法处理后角点个数最小阈值为 m , 对各角点坐标进行椭圆拟合 (图 4c), 获得椭圆相关参数并绘制轮廓, 填充后得到实际地表湿润区

时间 t 可取试验总时间内的 20~40 个等距节点, 代入式 (23) 等式右侧方程, 得到的数值点按照等式左侧方程进行拟合, 得到参数 B 值代入式 (16), 入渗曲线即实现位置匹配, 完成土壤入渗模型建立。

根据水量平衡原理进行误差验证, 水量平衡误差 δ 为

$$\delta = \left| \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \right| \times 100\% \quad (24)$$

1.3 地表湿润面积获取

1.3.1 图像校正

通过透视变换算法^[20] 实现拍摄图像与实物图像的配准 (图 2)。标靶由木板与 4 个红色圆柱热源点 (40°C) 组成, 上下及左右热源点间距均为 50 cm, 且围绕标靶中心呈对称分布。

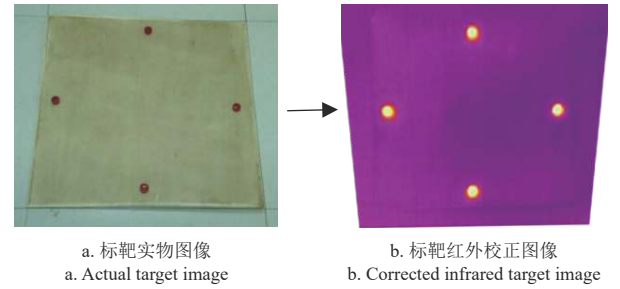


图 2 正方形红外标靶校正
Fig.2 Correction of square infrared target

1.3.2 图像预处理

图像预处理是图像湿润区域准确识别的前提。首先将校正后的图像灰度化^[21], 获得灰度图像 (图 3c); 然后对灰度图进行中值滤波^[22] 处理, 采用核大小为 3×3 的像素矩阵对图像去噪处理, 可以兼顾保留湿润边界的信息; 使用大津法和采取阈值限制对滤波后的图像进行自适应阈值分割^[23-24]。为了提高图像分割质量和响应速度, 自适应分割时灰度阈值上下限分别取 70 和 40, 得到二值图像 (图 3e), 完成初步湿润区域的提取。

域 (图 4d)。当预处理灰度值在 40~70 之外, 湿润区域提取效果较差时, 采取人工辅助的方式标注新角点, 再采用新角点进行椭圆拟合, 使得处理后获得的椭圆轮廓符合真实湿润区域轮廓。

使用轮廓面积计算函数^[29] 获取处理后的椭圆区域的面积, 得到实际地表湿润区域的识别面积 A 。将每帧图像所得的识别面积 A 与对应时间 t 的数据由式 (1) 拟合, 得到地表湿润面积与时间关系曲线。

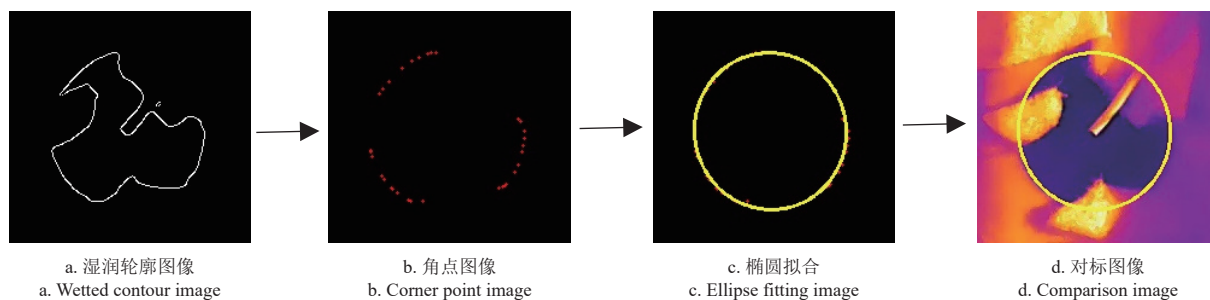


图 4 图像湿润区域提取示意
Fig.4 Diagram of extraction procedure of image wetted area

2 案例分析

2.1 试验材料和装置

试验在北京市农林科学院林果所 (39°58'28"N, 116°13'37"E) 完成。试验土壤取自北京市海淀区, 土壤类型为粉壤土和砂壤土, 粉壤土中粉粒、砂粒、黏粒质量分数分别为 54.91%、29.44% 和 15.65%, 填装容重为 1.35 g/cm³, 初始含水率为 4.12%; 砂壤土中粉粒、砂粒、黏粒质量分数分别为 31.62%、46.35% 和 22.03%, 填装容重为 1.41 g/cm³, 初始含水率为 2.68%。

点源入渗性能自动测量系统如图 5 所示。

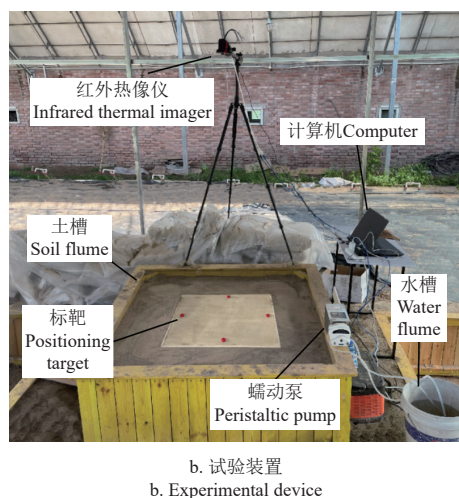
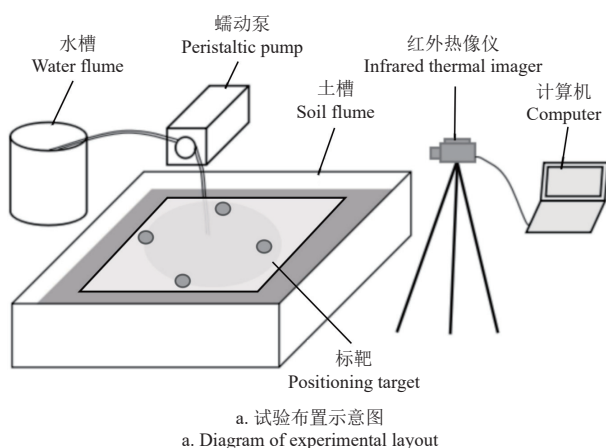


图 5 点源土壤入渗性能自动测量系统

Fig.5 Devices for automatic measurement of soil infiltrability

采用蠕动泵恒流供水, 经标定水泵转速与流量之间的关系为

$$\omega = 18.725q + 0.609 \quad (25)$$

式中 ω 为恒定流蠕动泵的转速, r/min; q 为软管流量, L/h。红外热像仪 (型号: HX1-M3-T 系列) 与计算机连接, 使用 python 编写的交互软件可实现红外热像仪定时拍照控制及后期的数据处理。

2.2 试验方案

土壤风干后过筛 (筛孔 2 mm×2 mm), 按填装容重, 每层 5 cm 分层装入长 2 m、宽 2 m、深 0.5 m 的木质土槽。将土样放入土槽后, 地表用耙子整平。土槽的装土深度为 40 cm。

试验选取恒定供水流量为 2 L/h, 土槽上随机放置 50~200 cm² 形状不同的假草皮作为地表遮挡物 (图 6)。试验前先将标定板置于地表进行拍照并校正, 完成后移走标定板; 将软管出水口置于土槽中心, 采集地表湿润图像; 采集结束后, 采用根据本文的测量方法编制的软件获取真实地表湿润面积及入渗率等数据。



图 6 地表覆盖物布置

Fig.6 Sketch of surface cover layout

2.2.1 湿润面积提取试验

试验设计 3 种土槽坡度: 0°、5°和 8°。试验中, 当覆盖物分别遮挡住湿润轮廓的 20%、40%、50%、60%、65%、70%、75%、80% 时暂停蠕动泵供水, 并拍照留存, 然后迅速用镊子取走覆盖物并再次对地表湿润区域原位拍照, 完毕后将覆盖物放回原印记位置, 蠕动泵继续供水进行试验。

使用自研软件对试验图片进行校正, 自动提取完整湿润区域并计算地表湿润面积, 即识别面积; 使用 Photoshop 软件计算覆盖物遮挡住湿润轮廓的实际占比, 并获得去除覆盖物后的地表湿润面积, 即真实面积。

2.2.2 室内试验

试验设计 3 种土槽坡度: 0°、5°和 8°, 每个坡度试验重复 3 次。试验设定前 10 min, 每隔 1 min 获取一次湿润面积图像; 然后每隔 3 min 获取一次湿润面积图像,

获取 10 次；最后每隔 10 min 获取一次湿润面积图像，获取 10 次。

每次试验用时 140 min，获得图片 31 张。试验结束后使用自研软件处理图像，计算地表湿润面积及土壤入渗性能。

2.2.3 田间验证试验

为检验该方法及其配套系统在野外测量的可靠性，选取 3 处自然状态下有植被或枯落物覆盖的区域进行田间试验（图 7）。

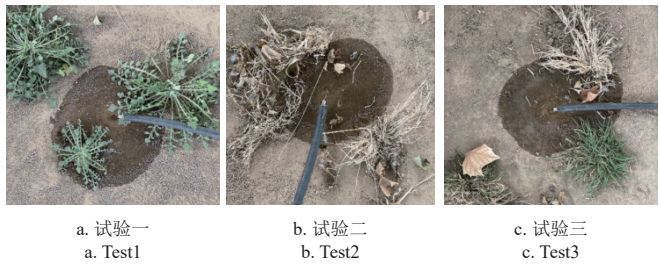


图 7 田间试验
Fig.7 Field experiment

试验一区域坡度为 0.91°，土壤类型为粉壤土，测得粉粒、砂粒、黏粒质量分数分别为 58.21%、21.33% 和 20.46%，容重为 1.39 g/cm³，初始含水率为 7.90%。试验二区域坡度为 2.63°，土壤类型为粉壤土，测得粉粒、砂

粒、黏粒质量分数分别为 56.72%、22.91% 和 20.37%，容重为 1.42 g/cm³，初始含水率为 7.82%。试验三区域坡度为 4.13°，土壤类型为粉壤土，测得粉粒、砂粒、黏粒质量分数分别为 56.43%、23.00% 和 20.57%，容重为 1.40 g/cm³，初始含水率为 7.32%。试验设定恒定供水流量 2 L/h，试验方案与室内相同。

3 结果与分析

3.1 地表湿润面积测量

由表 1 可知，对于试验的 2 种土壤，当地表湿润轮廓覆盖度小于 60% 时，地表湿润面积识别误差波动在 5% 左右；当地表湿润轮廓覆盖度小于 70% 时，3 个坡度下，地表湿润面积识别误差均小于 15%；当轮廓覆盖度在 70%~80% 时，地表湿润面积测量误差显著增大。坡度和轮廓覆盖度 2 类土壤的面积识别影响作方差分析，其结果如表 2 所示。坡度对地表湿润面积识别误差影响均不显著（ $P>0.05$ ）；轮廓覆盖度对地表湿润面积识别误差影响极显著（ $P<0.01$ ）。面积识别误差可能来源于测量拍照时土壤水分的再分布，造成覆盖物移除后再次拍摄得到的地表湿润面积数据相对变大，加大了测量误差；蠕动泵软管供水时对湿润区域的覆盖也会对面积识别产生一定影响。

表 1 轮廓覆盖度对地表湿润面积识别精度的影响

Table 1 Effect of contour coverage on identification accuracy of surface wetted area							
坡度 Slope gradient/(°)	轮廓覆盖度 Contour coverage/%	真实面积 Actual area/mm ²		识别面积 Identification area/mm ²		识别误差 Identification error/%	
		粉壤土 Silt loam	砂壤土 Sandy loam	粉壤土 Silt loam	砂壤土 Sandy loam	粉壤土 Silt loam	砂壤土 Sandy loam
0	20	15 511.738	14 328.135	15 562.491	15 594.105	0.327	0.531
	40	15 761.821	14 561.384	16 072.355	15 552.819	1.970	1.326
	50	15 938.725	15 120.158	15 771.057	16 090.780	1.052	0.954
	60	16 229.113	15 685.387	16 069.754	16 593.943	0.982	2.248
	65	16 579.546	15 964.812	15 984.879	15 729.513	3.587	5.127
	70	16 600.625	16 534.952	14 076.157	18 665.577	13.207	12.439
	75	16 733.997	17 002.435	14 341.670	13 992.634	14.297	16.382
	80	16 835.354	17 609.388	14 309.436	12 773.993	19.004	24.124
5	20	15 605.191	15 364.586	15 924.809	15 455.693	2.048	0.958
	40	15 994.818	15 864.328	16 216.372	16 253.134	1.385	1.615
	50	16 125.570	16 628.341	15 716.792	16 962.326	2.535	5.189
	60	16 279.419	17 235.624	15 740.902	15 653.150	3.308	3.847
	65	17 215.967	17 559.661	15 264.919	18 274.405	11.333	6.148
	70	18 572.130	18 053.667	16 602.39	20 738.940	10.606	11.667
	75	20 024.380	18 864.593	16 300.958	16 618.233	18.594	17.014
	80	20 611.256	19 524.379	15 456.257	25 733.359	25.010	24.851
8	20	19 876.445	18 636.248	19 879.547	20 007.828	0.016	0.661
	40	20 916.836	18 925.185	20 612.603	20 468.170	1.454	2.145
	50	21 302.386	19 354.158	20 365.713	22 200.921	4.397	4.218
	60	21 611.270	19 862.143	20 769.171	22 552.441	3.897	4.355
	65	23 088.655	20 821.482	21 614.797	20 968.655	6.383	9.182
	70	23 433.216	21 553.454	20 109.458	20 563.584	14.184	12.246
	75	24 229.662	22 053.263	20 113.927	28 831.602	16.986	18.993
	80	26 978.204	22 351.242	19 873.526	21 128.520	26.335	21.683

表 2 坡度和轮廓覆盖度对面积识别影响的方差分析

Table 2 Variance analysis of the influence of slope gradient and contour coverage on area identification					
土壤类型 Soil type	指标 Indexes	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F 值 F-value	P 值 P-value
粉壤土 Silt loam	坡度	27.118	13.559	0.189	0.798
	轮廓覆盖度	1 463.330	209.047	49.776	<0.001
砂壤土 Sandy loam	坡度	7.437	3.718	0.053	0.948
	轮廓覆盖度	1 440.330	205.761	105.705	<0.001

3.2 土壤入渗性能

粉壤土和砂壤土地表湿润面积动态变化如图 8 所示。结果表明，2 种土壤在同一坡度下各次重复试验结果之间差异不显著（ $P>0.05$ ），这说明该方法具有良好的稳定性。采用式（1）拟合的决定系数 R^2 均达到 0.99，表明该方法可高精度地记录实际地表湿润面积随时间的推进过程。同种土壤类型，坡度越大，试验结束时的地表湿润面积越大。流量一定时，相同坡度下粉壤土的地表

最终湿润面积比砂壤土更大。这是因为, 砂壤土土壤容重较小, 大孔隙较多, 受重力因素影响下渗能力更强;

而粉壤土密实度较大, 土壤渗透能力较小, 水分更易向四周扩散, 这与李晓斌等^[30]的研究结果一致。

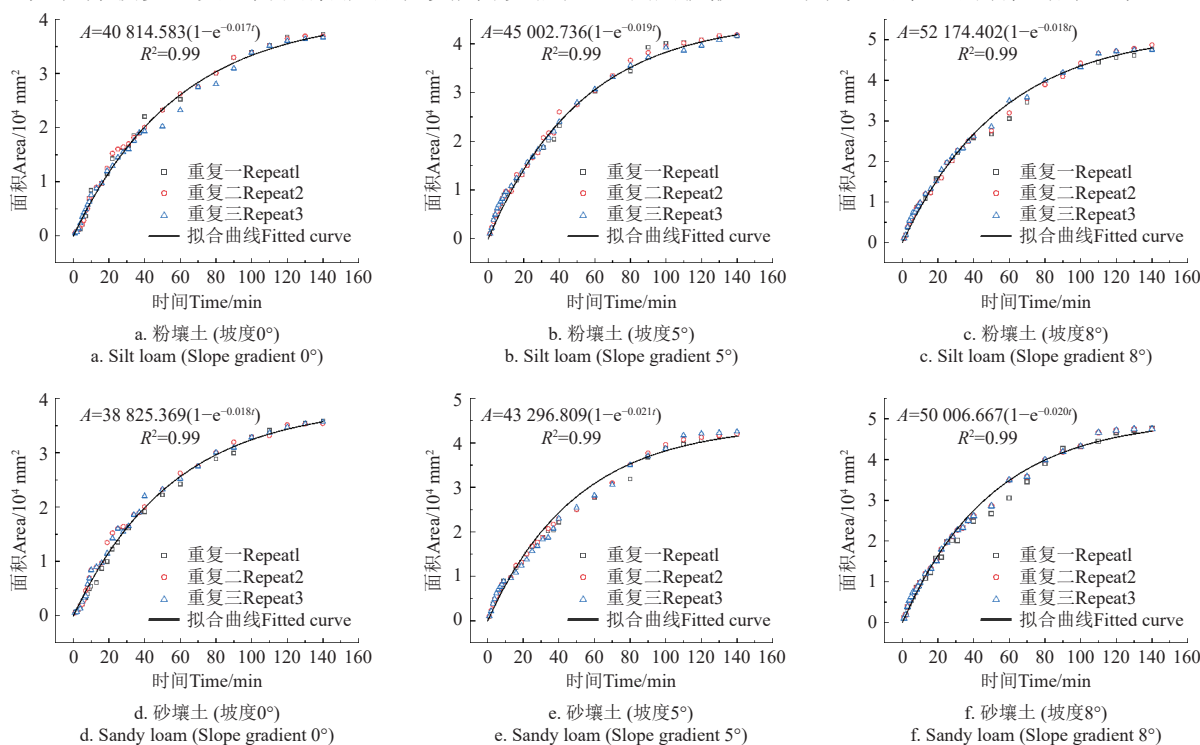


图8 重复试验面积拟合函数曲线

Fig.8 Repetitive test area fitting function curve

根据土壤入渗模型配位后得到的入渗曲线如图9所示。相同条件下, 随着坡度增加, 稳定入渗率呈现轻度减小的趋势; 同一坡度下, 砂壤土的稳定入渗率相对粉壤土更大。

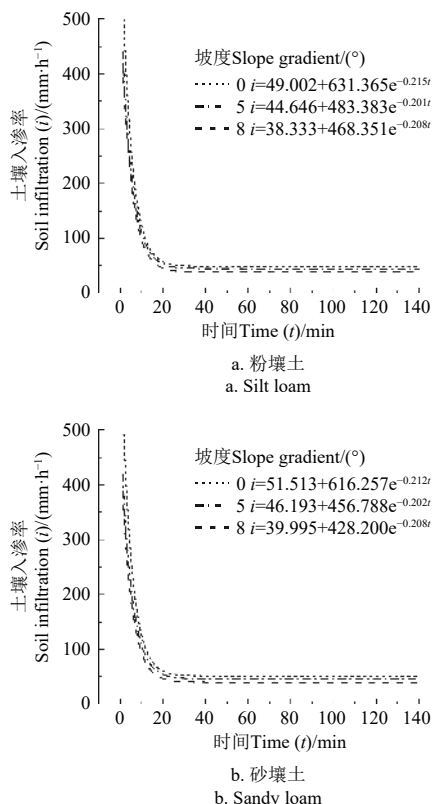


图9 土壤入渗率曲线

Fig.9 Soil infiltrability curve

由表3可知, 入渗曲线配位前后水量平衡误差变化较大, 配位提高测量精度的效果十分显著。使用配位后的土壤入渗模型测量2类土壤不同坡度下的土壤入渗性能, 计算得到的水量平衡误差均在1.5%以下, 显著提高了土壤入渗性能的测量精度, 证明了地表有覆盖物遮挡时点源土壤入渗测量系统的可行性。

表3 入渗曲线配位前后水量平衡误差计算结果

Table 3 Calculation results of water balance error before and after coordination of infiltration curve %			
土壤类型 Soil type	坡度 Slope gradient/(°)	配位前 Before	配位后 After
粉壤土 Silt loam	0	9.892	0.752
	5	11.586	1.186
	8	10.373	1.045
砂壤土 Sandy loam	0	9.151	0.869
	5	10.786	1.169
	8	11.037	1.034

3.3 田间试验

田间试验结果如图10所示, 试验二和试验三中初期地表湿润面积失拟较明显。这可能是因为, 试验区域表层土壤结构结皮, 结皮层的孔隙度低; 结皮层的渗透系数远小于原土壤, 在一定程度上阻碍了水分的下渗, 导致更多的水分向地表四周扩散, 增大了初期地表湿润面积。相较于室内试验, 田间试验的地表沟壑、地表温度、覆盖物种类及覆盖物表层温度的不确定性等因素都会对地表湿润面积识别产生一定影响。图10中面积拟合曲线的决定系数 R^2 均不小于0.98, 表明在各种因素影响下地表湿润面积曲线拟合仍具有较高的可靠性。

由图10可知, 相对于室内试验, 3组田间试验初始入渗率均较低, 这与试验中观测到的地表结皮的影响规

律一致；结皮导致表层土壤渗透能力低，土壤入渗量大
幅减少，并使得结皮层以下的土壤很长一段时间内都处
于非饱和状态，降低了初始阶段的土壤入渗率。

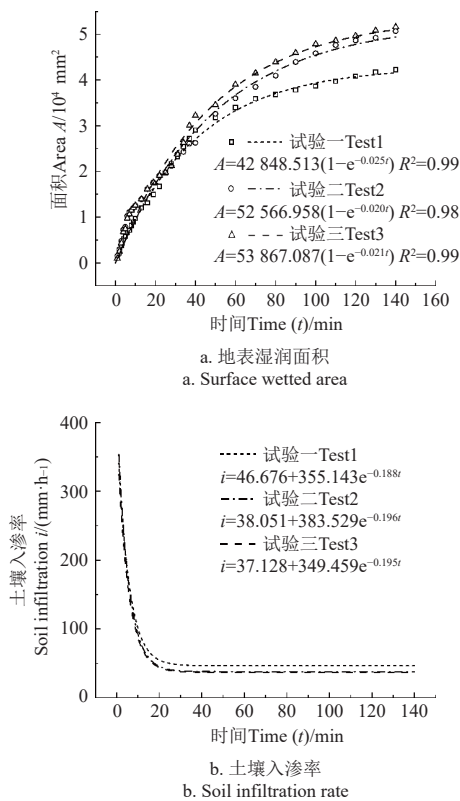


图 10 田间试验地表湿润面积和土壤入渗率变化
Fig.10 Change of surface wetted area and soil infiltration rate
under field condition

3 组田间试验的稳定入渗率相对于室内试验均较低。
这可能是由于受水文过程或耕作的影响，田间土壤在一
定程度上存在层次结构；室内试验土壤较松散，孔隙度
较大；田间试验区域中下层土壤更加密实，入渗性能更
差，稳定入渗速率降低。

由图 10 可知，不同试验区域的面积拟合曲线和土壤
入渗率曲线均符合预期效果。对 3 组田间试验入渗测量
结果进行水量平衡误差计算，结果如表 4 所示；3 组田
间试验水量平衡误差均小于 2%，这表明点源土壤入渗测
量方法，在不破坏地表结构下，可有效测得土壤本征入
渗性能。

表 4 田间试验水量平衡误差计算结果
Table 4 Calculation results of water balance error in
field experiments

试验区域 Test area	供水量 Water supply/mm ³	入渗量 Infiltration amount/mm ³	相对误差 Relative error/%
试验一 Test 1	4 666 666.667	4 620 233.673	0.995
试验二 Test 2	4 666 666.667	4 723 086.525	1.209
试验三 Test 3	4 666 666.667	4 721 126.359	1.167

雷廷武等^[15]提出的原测量方法中，采用数码相机记
录地表湿润面积随时间的变化过程，再由入渗模型得到
的整体入渗过程，计算水量平衡误差为 6.1%。使用本文
改进的测量方法得到的测量结果的水量平衡误差明显减
小，提高了土壤入渗性能的测量精度，且本文方法能测
定覆盖状态下土壤入渗性能。未来可以使用该方法对更

多种类的土壤展开试验，改进模型，以进一步提高对复
杂环境的适应能力及测量精度。

4 结 论

本文提出了一种基于红外视觉的点源土壤入渗性能
自动测量方法，开发了对应的测量系统，设置了室内和
田间试验，研究了方法的可行性及测量精度。研究结论
如下：

1) 采用红外视觉技术，通过图像校正、预处理及点
源湿润面积提取，构建了精确的地表湿润面积识别算法。
试验结果表明，当地表湿润区域轮廓覆盖度小于 60% 时，
湿润面积识别误差在 5% 左右，可满足土壤入渗性能
的高度准确测量要求；建立了地表湿润面积与时间拟合方
程 ($R^2\geq0.98$)，可精确地描述有覆盖物遮挡时地表湿
润面积随时间推进过程。

2) 提出了土壤入渗性能曲线的形状基函数，通过对
入渗曲线配位得到了高精度土壤入渗性能测量模型，经
田间试验水量平衡检验，误差小于 2%。

本研究为水文水资源、土壤侵蚀、农业灌溉等研究
提供了一种能够在有覆盖物等复杂环境下实现原状测量
土壤入渗性能的可靠方法。

[参 考 文 献]

[1] 张婧, 雷廷武, 张光辉, 等. 环式入渗仪测量土壤初始入
渗率效果试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 140-146.
ZHANG Jing, LEI Tingwu, ZHANG Guanghui, et al. A new
experimental method for observing initial soil infiltration under
ring infiltrometer[J]. Transactions of the Chinese Society for
Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 140-146. (in Chinese
with English abstract)

[2] 张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考[J]. 水土保持学报,
2020, 34(4): 21-30.
ZHANG Guanghui. Several ideas related to soil erosion
research[J]. Journal of Soil and Water conservation, 2020, 34(4):
21-30. (in Chinese with English abstract)

[3] LI C, PAN C. The relative importance of different grass
components in controlling runoff and erosion on a hillslope
under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558:
90-103.

[4] 周利颖, 李瑞平, 苗庆丰, 等. 河套灌区不同掺沙量对重
度盐碱土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2020,
36(10): 116-123.
ZHOU Liying, LI Ruiping, MIAO Qingfeng, et al. Effects of
different sand ratios on infiltration and water-salt movement of
heavy saline-alkali soil in Hetao irrigation area[J]. Transactions
of the Chinese Society of Agricultural Engineering
(Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 116-123. (in
Chinese with English abstract)

[5] 陈磊, 张科利, 李业桐, 等. 喀斯特坡耕地块石出露对
土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10):
111-118.
CHEN Lei, ZHANG Keli, LI Yetong, et al. Effects of rock
outcropping on soil water infiltration in karst cropland slope[J].
Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 111-118. (in Chinese with English abstract)
- [6] 冯正江, 聂卫波, 余淼, 等. 多尺度土壤入渗特性的变异特征和传递函数构建[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 64-75.
FENG Zhengjiang, NIE Weibo, YU Miao, et al. Multiple scale variability of soil infiltration characteristics and establishment of pedo-transfer function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(13): 64-75. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张超, 姜景山, 王如宾, 等. 降雨非饱和入渗对土壤热量运移变化的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 118-126.
ZHANG Chao, JIANG Jingshan, WANG Rubin, et al. Influences of rainfall unsaturated infiltration on the change of heat transfer in soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 118-126. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孙蓓, 马玉莹, 雷廷武, 等. 农地耕层与犁底层土壤入渗性能的连续测量方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 118-124.
SUN Bei, MA Yuying, LEI Tingwu, et al. Method for continuously measuring soil infiltrability of flow-cultivated layer and hardpan in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(4): 118-124. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘芳芳, 王伟, 雷廷武, 等. 点源入流测量条件下水质对盐碱土入渗性能的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(2): 179-184.
LIU Fangfang, WANG Wei, LEI Tingwu, et al. A point source method for determining the effect of water quality on soil infiltration capability[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(2): 179-184. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙权, 张建丰, 张杰, 等. 自动双环入渗仪设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 318-324.
SUN Quan, ZHANG Jianfeng, ZHANG Jie, et al. Design and experiment of automatic double-ring infiltrometer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 318-324. (in Chinese with English abstract)
- [11] 余冬立, 高雪梅, 房凯. 利用圆盘入渗仪测定不同土地利用类型土壤吸渗率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 151-158.
SHE Dongli, GAO Xuemei, FANG Kai. Measurement of soil sorptivity rate under different land uses by disc infiltrometer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(18): 151-158. (in Chinese with English abstract)
- [12] OGDEN C B, VAN E H M, SCHINDELBECK R R. Miniature rain simulator for measurement of infiltration and runoff[J]. Soil Science Society of American Journal, 1997, 61: 1041-1043.
- [13] LEI T, PAN Y, LIU H, et al. A run off-on-ponding method and models for the transient infiltration capability process of sloped soil surface under rainfall and erosion impacts[J]. Journal of Hydrology, 2006, 319: 216-226.
- [14] 雷廷武, 刘汗, 潘英华, 等. 坡地土壤降雨入渗性能的径流-入流-产流测量方法与模型[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2005, 35(12): 1180-1186.
- [15] 雷廷武, 毛丽丽, 李鑫, 等. 土壤入渗性能的线源入流测量方法研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 1-5.
LEI Tingwu, MAO Lili, LI Xin, et al. Method for measuring soil infiltrability with linear run-on of water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [16] 管瑶, 雷廷武, 刘芳芳, 等. 土壤点源入渗自动测量系统监测滴头下土壤湿润过程[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 1-7.
GUAN Yao, LEI Tingwu, LIU Fangfang, et al. Measurement of wetting process of soil under dripper with automatic system for point source infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(14): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵志刚, 王鑫, 彭廷海, 等. 国外中长波双波段红外成像技术的发展及应用[J]. 红外技术, 2020, 42(4): 312-319.
ZHAO Zhigang, WANG Xin, PENG Tinghai, et al. Status quo and application of middle and long wave dual-band infrared imaging technologies in occidant[J]. Infrared Technology, 2020, 42(4): 312-319. (in Chinese with English abstract)
- [18] DAVID L D. Machine vision trends[J]. Quality, 2023, 62(1): 24-24.
- [19] FADADU M H, SHRIVASTAVA P K, DWIVEDI D K. Application of Horton's infiltration model for the soil of Dediapada (Gujarat), India[J]. Journal of Applied and Natural Science, 2018, 10(4): 1254-1258.
- [20] CHAD H, KAISU M, FERGAL F. Developing the Theory of Perspective Transformation[J]. Adult Education Quarterly, 2017, 67(1): 48-64.
- [21] 刘亚, 张团善, 王恩芝. 基于高效边缘检测的彩色图像灰度化算法[J]. 轻工机械, 2022, 40(6): 52-58.
LIU Ya, ZHANG Tuanshan, WANG Enzhi. Color image decolorization algorithm based on efficient edge detection[J]. Light Industry Machinery, 2022, 40(6): 52-58. (in Chinese with English abstract)
- [22] PRASAD S B R, CHANDANA B S. Objects and action detection of human faces through thermal images using ANU-net[J]. Sensors, 2022, 22(21): 8242-8242.
- [23] XU M. Background interference removal algorithm for PIV preprocessing based on improved local Otsu thresholding[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2022, 31(4): 147-159.
- [24] LI C, YUAN C J, PAN H B, et al. Single-image dehazing based on improved bright channel prior and dark channel prior[J]. Electronics, 2023, 12(2): 299-299.
- [25] 李昺星, 任江龙. 基于改进 Canny 算子高低阈值选取的遥感图像边缘检测[J]. 现代信息科技, 2022, 6(20): 81-83, 89.
LI Bingxing, REN Jianglong. Remote sensing image edge detection based on improved canny operator high and low threshold selection[J]. Modern Information Technology, 2022,

- 6(20): 81-83, 89. (in Chinese with English abstract)
- [26] 成昊天, 丁荣莉, 胡博文, 等. 基于 HLS 的红外遥感图像连通域快速提取方法[J]. 上海航天 (中英文), 2021, 38(4): 144-151.
- CHENG Haotian, DING Rongli, HU Bowen, et al. Fast extraction method for connected domain of infrared remote sensing image based on high level synthesis[J]. Aerospace Shanghai, 2021, 38(4): 144-151. (in Chinese with English abstract)
- [27] MORI T, MANABE T, SHIBATA Y. A Hardware oriented approximate convex hull algorithm and its FPGA implementation[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2022, 3: 459-467.
- [28] 何振嘉. 涌泉根灌单点源入渗湿润体特性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(S1): 34-37.
- HE Zhenjia. Characteristics of wetting body under bubbled-root irrigation point source infiltration[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(S1): 34-37. (in Chinese with English abstract)
- [29] HIMANSHU S. Practical Machine Learning and Image Processing[M]. Berkeley, CA: Apress, 2019.
- [30] 李晓斌, 孙海燕. 不同土壤质地的滴灌点源入渗规律研究[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(15): 4292-4295.
- LI Xiaobin, SUN Haiyan. Experimental research about point source drip irrigation infiltration under different soil texture[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(15): 4292-4295. (in Chinese with English abstract)

Method improvement for soil infiltrability measurement based on surface wetted area evolution of the point source infiltration monitored by infrared vision

WANG Wei¹, CHENG Xiaolei², ZHUANG Xiaohui³, WU Yang⁴, LU Fuyun¹, YU Fangqian¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. China Agricultural Mechanization Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100122, China; 3. College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China; 4. Institute of Forestry and Fruit Trees, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: Soil infiltrability is a one of the key parameters in the fields of agriculture and near surface hydrology. The rapid and accurate measurement has a theoretical and practical significance. However, it is difficult to accurately measure the extremely high infiltration rate in the initial infiltration stage, due to the limitations of measurement principle. In addition, the presence of vegetation cover can also affect the acquisition of surface wetted area in the point source infiltration body, leading to an increase in the measurement error of infiltration rate. In this study, the system was proposed to achieve the automatic and accurate measurement of soil infiltrability with the presence of surface cover. The image correction and preprocessing were adopted to extract the surface wetted area. An infrared thermal imager was also used to record the progress of surface wetted area over time. The shape-based function of soil infiltrability curve was developed using the first-order derivative of the variation of soil wetted area over time. A complete soil infiltrability model was then established, according to the principle of water balance. A device was built to measure the soil infiltrability. The laboratory and field experiments were carried out to validate the measurement accuracy. The indoor experiments were conducted with the soils of sandy loam and silty loam, under surface slope gradients of 0°, 5° and 8°, and surface coverage of 20%, 40%, 50%, 60%, 65%, 70%, 75% and 80%, respectively. The field validation experiments were conducted on three sites with the natural surface covers, in order to measure the changes in surface wetted area and soil infiltration rate over time. The results show that the surface slope gradient and soil type shared no significant effects on the accuracy of surface wetted area monitoring, whereas, the surface coverage posed a significant impact on the recognition of surface wetted area. Especially, the recognition error of surface wetted area was about 5% with the surface coverage less than 60%, fully meeting the requirements for soil infiltrability measurement. The measurement error of surface wetted area significantly increased, when the contour line was covered by the vegetation from 70% to 80%. The determination coefficients of the fitted equations between the surface wetted area and time were not all less than 0.98, indicating the better performance of the model on the surface wetted area over time under the vegetation cover conditions. Both surface wetted area function and soil infiltrability function also performed the best in the laboratory and field experiments. The water balance errors of indoor and field infiltration experiments were both less than 2%, indicating a relatively high accuracy of soil infiltrability model without the disturbance of the natural soil surface. The finding can provide an alternative way easy to apply with a sufficient accuracy, particularly for the in-situ measurement of soil infiltrability in filed with the presence of natural surface cover.

Keywords: soils; infiltration; design; infrared image; point source; shape-based function; water balance