

土壤质地对比率法测量饱和土壤水通量方向精度的影响

卢富运¹ 武 阳² 杨锡坚¹ 王 伟¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093)

摘要: 土壤水通量方向是饱和土壤流场的关键参数。受质地影响,土壤孔隙连通性和与之相关的土壤水流方向具有随机性,应在一定的空间尺寸下测量水通量方向。基于矢量合成原理,结合比率法可测量饱和土壤水通量方向。因此设计了一种五针热脉冲探头,测量平面内任意2个相互垂直的水通量,并通过矢量合成确定水通量方向。在饱和砂土、砂壤土和粉壤土中进行试验,每种土壤重复填装3次。试验结果表明,该方法测量土壤水通量方向的精度受土壤质地影响显著。当试验水通量大于4 cm/h时,饱和砂土、砂壤土和粉壤土中角度测量值平均绝对值百分比误差(MAPE)分别为4.96%、6.18%和15.06%,表明水通量角度测量精度随着土壤质地变细逐渐下降。与水通量小于4 cm/h相比,水通量大于4 cm/h时砂土、砂壤土和粉壤土角度测量值标准差分别减小10.40°、6.65°和6.71°,表明水通量角度测量精度随着水通量增加而提高。在试验水通量大于6 cm/h的砂土和大于3 cm/h的砂壤土中得到了较稳定的水通量角度测量值(绝对误差小于7.5°),粉壤土中未得到稳定的角度测量值。说明在不同水通量和水力梯度下不同质地填装土壤孔隙连通性存在差异,进而影响了水通量角度测量精度。另外,土壤颗粒与探头间距的几何尺寸关系也会影响比率法测量精度。研究结果对热脉冲技术发展及其实际应用具有推动作用。

关键词: 土壤水通量方向; 土壤质地; 比率法; 五针热脉冲探头; 热脉冲技术

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)04-0399-08

OSID:



Impact of Soil Texture on Accuracy of Saturated Soil Water Flux Direction Measurement Through Ratio Method

LU Fuyun¹ WU Yang² YANG Xijian¹ WANG Wei¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: The direction of soil water flux is a key parameter in saturated soil flow fields. Soil texture significantly affects pore connectivity, which introduces randomness into the direction of water flow. Therefore, measuring water flux direction requires consideration of an appropriate spatial scale. The direction of saturated soil water flux can be determined by combining the ratio method with the principle of vector composition. Based on the above requirements, a penta-needle heat pulse probe (PHPP) was designed to measure water flux magnitude in any two mutually perpendicular directions within a plane and to determine flux direction through vector composition. Experiments were conducted in saturated sand, sandy loam, and silt loam, with each soil type repacked three times. The experimental results showed that the accuracy of this method in measuring soil water flux direction was significantly influenced by soil texture. For fluxes greater than 4 cm/h, the mean absolute percentage errors (MAPE) of angle measurements in sand, sandy loam, and silt loam were 4.96%, 6.18%, and 15.06%, respectively. This indicated that the accuracy of water flux direction measurements was decreased with finer soil texture. Compared with fluxes below 4 cm/h, the standard deviations of angle measurements in sand, sandy loam, and silt loam were decreased by 10.40°, 6.65° and 6.71°, respectively, for fluxes above 4 cm/h. This indicated that the accuracy of water flux direction measurements was improved with the

收稿日期: 2025-05-21 修回日期: 2025-06-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(41571257)
作者简介: 卢富运(1995—),男,博士生,主要从事土壤侵蚀监测技术研究,E-mail: lufuyun69@163.com
通信作者: 王伟(1971—),男,副教授,博士,主要从事水土保持和土壤侵蚀研究,E-mail: weiwang@cau.edu.cn

increase of flux. Stable water flux angle measurements, with absolute errors below 7.5° , were achieved in sand at fluxes above 6 cm/h and in sandy loam above 3 cm/h, but not in silt loam. These findings suggested that pore connectivity in packed soils varied with texture under different fluxes and hydraulic gradients, thereby affecting measurement precision. Additionally, the geometric relationship between soil particle size and probe spacing affected the measurement accuracy of the ratio method. Optimizing the probe spacing of the PHPP based on soil particle size distribution may improve the reliability of water flux angle measurements by using the vector composition method. These findings can contribute to the development and practical application of heat pulse technology.

Key words: soil water flux direction; soil texture; ratio method; penta-needle heat pulse probe; heat pulse technique

0 引言

在水资源短缺及自然灾害频发的背景下,土壤水动态监测逐渐成为关注的焦点^[1-6]。土壤水通量是重要的水文指标之一,是影响根系水分吸收、养分和污染物迁移以及地下水补给等多种土壤与环境交互过程的重要因素^[7-8]。目前,准确地获得土壤饱和带水通量仍是一个技术难题^[9-10]。温度传感技术的发展使热示踪剂测量土壤水通量成为可能^[11]。

目前,热脉冲技术被广泛应用于测量土壤水通量^[12]。该方法主要是通过一线性热源释放热量,并在已知距离处监测土壤温度变化^[13];通过水流对温度场的影响,从温度变化量推导出土壤水通量信息。常用的热脉冲方法包括上下游最大无量纲温差法和上下游温度升高比率法^[14]。最大无量纲温差法是基于土壤水通量与土壤热特性参数、热源下游与上游一定距离的最大无量纲温差之间关系的解析解^[15],而比率法在此基础上进行了简化,通过热源下游与上游一定距离的温度升高比值求解^[16]。2种方法均采用三针热脉冲传感器,该传感器由1个中心加热探针和2个与加热探针平行且等距的温度传感器探针组成。与最大无量纲温差法相比,比率法在参数要求、计算过程和测量精度方面都存在一定优势^[17]。

热脉冲法测量土壤水通量的精度受多种因素影响,包括模型原理、水通量测量范围和土壤质地^[17-19]。多数研究结果表明土壤质地是其中一个重要的影响因素^[15,17,20-21]。热脉冲法测量饱和水通量在砂土中精度较高,但在质地较细的土壤中,测量水通量存在被低估的倾向^[20-23]。原因可能包括模型中忽略了热弥散、加热探针物理尺寸的影响^[19]和试验方法误差^[24]。

1个平面土壤水通量方向,可以通过在该平面内任意2个相互垂直方向的水通量矢量合成得到^[25]。基于上述原理,针对土壤水通量矢量测量,已有研究者进行了尝试。在非饱和排水条件下,使

用反求法(Inverse method)实现了砂土、砂壤土和砂质黏壤土中水通量水平和竖直分量测量,并结合有限元模拟结果,分析各土壤测量位置水通量矢量随时间的变化规律^[26]。在饱和砂土中,使用反求法测量安装角度 15° 、 30° 和 45° 下的土壤水通量矢量,结果表明,当水通量为10~7 000 cm/d时,水通量测量值均方根误差为0.093~0.107 lg(cm/d),测量角度均值误差小于14%^[27]。

综上所述,土壤质地影响土壤水通量的测量精度,故采用矢量合成法确定水通量方向也必然受土壤质地影响,已有针对砂土类型关于水通量方向的研究^[25,27]。在饱和土壤中,土壤质地对热脉冲法测量水通量进而对合成方向精度的影响规律仍不清楚。已有研究表明,采用比率法测量土壤水通量时,在不同质地土壤中,水通量测量值均存在被低估现象,但其测量值与真实值之间存在较好的线性关系^[20-21]。根据矢量合成原理,确定土壤水通量方向时,2个被加分量被低估这一系统误差应不会影响合成方向的测量精度。因此,本文在不同质地的土壤中,采用比率法测量2个相互垂直方向上土壤水通量,通过矢量合成确定水通量方向,并分析土壤质地对比率法测量饱和土壤水通量方向精度的影响,以为饱和土壤水通量测量提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 比率法测量原理

在各向同性土壤中,当 x 方向存在恒定流速的均匀水流时,垂直于 xy 平面的线性热源的二维热传输方程可表达为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} \right) - V \frac{\partial T}{\partial x}$$

(1)

其中

$$V = J \frac{C_w}{C_b}$$

(2)

式中 J ——土壤水通量,m/s
 T ——温度,K
 t ——时间,s

α ——土壤热扩散系数, m^2/s
 V ——热对流速度, m/s
 x, y ——空间坐标值
 C_w ——水容积热容量, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
 C_b ——土壤容积热容量, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
对式(1)进行积分可得解析解^[15]为

$$T(x,y,t) = \begin{cases} \frac{q}{4\pi\lambda} \int_0^t s^{-1} \exp\left(-\frac{(x-Vs)^2+y^2}{4\alpha s}\right) \text{d}s & (0 < t \leq t_0) \\ \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{t-t_0}^t s^{-1} \exp\left(-\frac{(x-Vs)^2+y^2}{4\alpha s}\right) \text{d}s & (t > t_0) \end{cases}$$

(3)

式中 λ ——土壤热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 q ——单位时间内单位长度加热丝释放的热量, $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s})$
 t_0 ——加热时间, s s ——积分变量

在解析解基础上,WANG 等^[16]研究表明,当上游探针和下游探针与热源之间距离相等时,下游探针与上游探针温度升高比值(T_d/T_u)是一个恒定值,即

$$\frac{T_d}{T_u} = \exp \frac{V(x_d+x_u)}{2\alpha}$$

(4)

式中 T_d ——在下游距热源 $x_d(\text{m})$ 时探针温度升高值, K
 T_u ——在上游距热源 $x_u(\text{m})$ 时探针温度升高值, K

将式(2)代入式(4)可得到比率法测量水通量模型为

$$J = \frac{2\lambda}{(x_d+x_u)C_w} \ln \frac{T_d}{T_u}$$

(5)

中间探针加热的三探针比率法只能测量沿探针排列方向的土壤水通量。在垂直于探针的二维平面内,任意方向的土壤水通量矢量通过测量 2 个相互垂直方向的土壤水通量分量,并进行矢量合成实现,即

$$|J| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2}$$

(6)

$$\varphi = \arctan \frac{J_y}{J_x}$$

(7)

式中 J_x —— x 方向土壤水通量, cm/h
 J_y —— y 方向土壤水通量, cm/h
 φ —— x 方向与水流方向夹角, $(^\circ)$

1.2 五针热脉冲探头

基于矢量合成原理,设计了一种五针热脉冲探头,测量 2 个相互垂直方向水通量。该探头由 1 个中心加热探针和 4 个在其圆周方向均匀分布的 T 型热电偶探针组成(图 1)。加热探针和热电偶探针直径分别为 2、1 mm,两者中心间距为 4 mm,所有探针

长度均为 20 mm。2 对热电偶探针(S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4)的连线方向相互垂直。加热探针由加热电阻丝和不锈钢外壳组成,外壳内剩余空间填充致密的氧化镁陶瓷材料。加热电阻丝电阻为 $17.2 \, \Omega$,施加电压为 15 V。热电偶探针包含 1 根 T 型热电偶和不锈钢外壳。

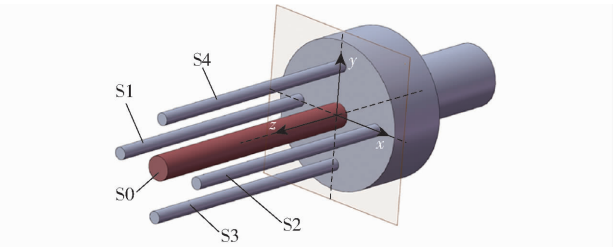


图 1 五针热脉冲探头(PHPP)模型

Fig. 1 Model of penta-needle heat pulse probe (PHPP)

1.3 试验土柱

试验土柱外壳为有机玻璃制造(内侧尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$),内部填充高度为 80 mm 的试验土壤(图 2)。试验选择 3 种质地土壤,分别为砂土、砂壤土和粉壤土(表 1)。

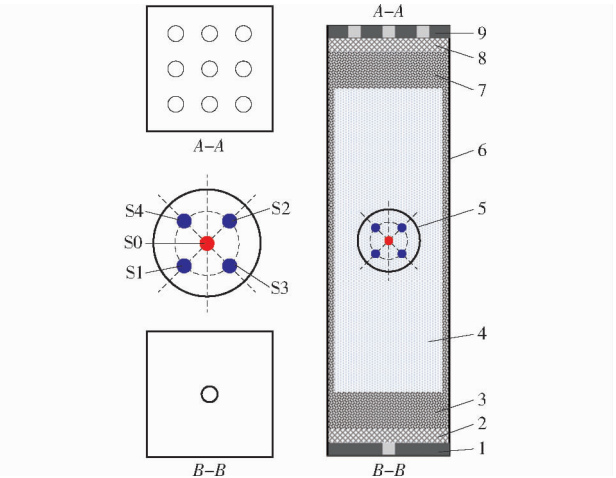


图 2 试验土柱示意图

Fig. 2 Schematic of experimental soil column

1. 底盖 2、8. 海绵 3、7. 粗砂 4. 试验土壤 5. PHPP 6. 有机玻璃方柱 9. 顶盖

表 1 试验土壤粒径分布、容重和饱和导水率

Tab.1 Particle-size distribution, bulk density, and saturated hydraulic conductivity for test soils					
质地	质量百分数/%			填装容重/ (g·cm ⁻³)	饱和导水率 K _{sat} / (cm·h ⁻¹)
	>0.050 mm	0.002 ~	0 ~		
	0.050 mm	0.002 mm			
砂土	95.60	4.40	0	1.46	34.64
砂壤土	51.31	47.06	1.63	1.39	3.18
粉壤土	25.16	69.72	5.12	1.33	2.70

试验土壤经干燥、研磨,并过 2 mm 筛,与蒸馏水均匀混合,使其含水率约为 $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[10]。将湿润的土样按预先设计的容重分层填入有机玻璃

方柱中。有机玻璃方柱内侧壁均匀涂抹一层胶水,并粘附一层粗砂,以增加侧壁摩擦力,防止沿边壁产生优先流。有机玻璃方柱设有上盖和下盖,并附有过滤材料,以防止由水流移动导致的试验土壤流失。在土样与上下盖之间分别填充1层海绵和粗砂,确保水流能够均匀地分布于土柱截面。上盖均匀分布钻孔,使水流在土柱出口处所受阻力均匀分布。根据 PHPP 各探针直径,在有机玻璃方柱的一个侧壁中央位置钻孔;PHPP 通过上述钻孔插入试验土壤中。采用石蜡密封各探针与侧壁间空隙,角度 φ 为 45° 。

1.4 试验设计

试验测量系统(图3)主要包括土柱、控制板、PHPP、水箱、蠕动泵和电子天平等。试验开始前,待测土柱在水中浸润24 h,排出土壤中的空气;然后使用 BT100-1 型蠕动泵(保定齐力恒流泵有限公司)以小流量缓慢向土柱供水,使试验水力系统达到稳定状态。试验土壤水通量由土壤饱和导水率确定;砂土最大水通量设为 37.22 cm/h,砂壤土和粉壤土的最大水通量分别设为 31.12、16.35 cm/h。试验过程中,通过调节蠕动泵转速实现设定流量。记录土柱出水口流量,除以土柱截面积得到水通量真实值。当土柱出水口流量稳定后,通过 JQC-3FF-S-Z 型继电器(深圳市明纬盛世科技有限公司)控制加热探针通电时间,产生一个 5 s 的热脉冲;通过 M2102 型温度采集模块(北京思迈科华技术有限公司)采集温度-时间数据,采集时间为 80 s,间隔为 0.25 s,精度为 0.1℃。每种质地土壤均分别重填3次,即试验重复3次,以减小土壤填充和探针插入土壤时等不可避免的试验误差。

1.5 探针间距校正方法

加热探针与温度传感器探针之间的间距是显著影响热脉冲方法测量土壤水通量精度的主要因素^[28]。饱和土柱中 PHPP 的各探针间距使用土壤热特性参数(表2)进行了原位校正,表中数据为3次测量平均值和标准差, r_i 为加热探针与热电偶探针 s_i ($i=1,2,3,4$) 之间的距离,其中试验土壤热特性参数计算式为^[29-30]

$$C_b = \rho_b c_s + \rho_w c_w \theta_s$$

(8)

表2 试验土壤热特性参数

Tab.2 Measured thermal properties of test soils							
质地	$\alpha/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$C_b/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	r_1/mm	r_2/mm	r_3/mm	r_4/mm
砂土	$(8.01 \pm 0.018) \times 10^{-7}$	2.47 ± 0.034	1.98 ± 0.054	3.98 ± 0.058	4.09 ± 0.094	4.08 ± 0.028	4.13 ± 0.074
砂壤土	$(6.85 \pm 0.033) \times 10^{-7}$	2.77 ± 0.016	1.90 ± 0.044	4.24 ± 0.024	4.13 ± 0.050	4.07 ± 0.066	4.16 ± 0.084
粉壤土	$(5.77 \pm 0.026) \times 10^{-7}$	2.95 ± 0.023	1.70 ± 0.062	4.02 ± 0.092	4.15 ± 0.058	4.07 ± 0.082	3.92 ± 0.060

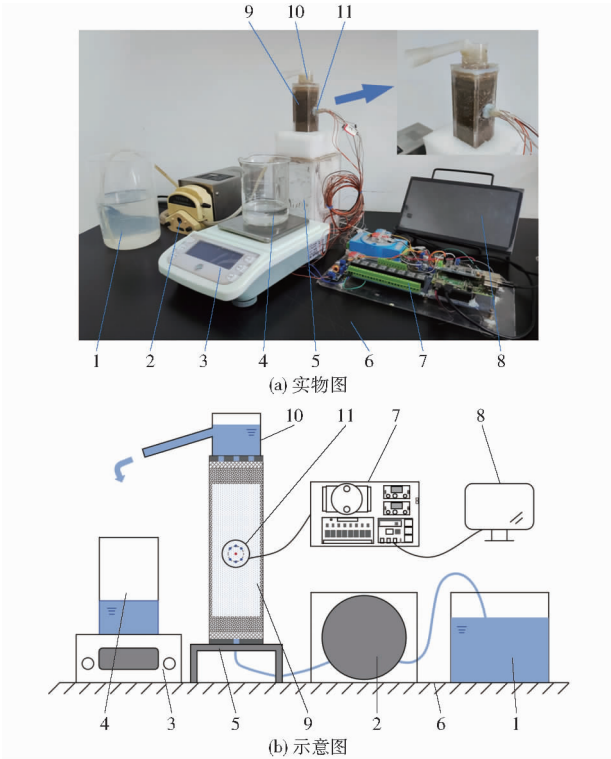


图3 试验装置

Fig.3 Experimental setup

1. 水箱 2. 蠕动泵 3. 电子天平 4. 集水容器 5. 支撑架
6. 实验台 7. 控制板 8. 显示屏 9. 土柱 10. 排水装置
11. PHPP

$$C_b = \frac{q}{4\pi\alpha\Delta T_m} \left[\text{Ei} \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t_m - t_0)} \right) - \text{Ei} \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_m} \right) \right]$$

(9)

$$\alpha = \frac{r^2}{4} \frac{\frac{1}{t_m - t_0} - \frac{1}{t_m}}{\ln \frac{t_m}{t_m - t_0}}$$

(10)

$$\lambda = \alpha C_b$$

(11)

- 式中 ρ_b ——土壤容重, kg/m^3
- c_s ——土壤比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- ρ_w ——水密度, kg/m^3
- c_w ——水比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- θ_s ——饱和土壤体积含水率, m^3/m^3
- ΔT_m ——探针温度变化最大值, K
- t_m ——探针温度变化最大值时间, s
- r ——测量点与线性热源之间距离, m
- $\text{Ei}(x)$ ——指数积分

1.6 模型评估方法

比率法测量土壤水通量采用平均绝对值百分比误差 (MAPE) 进行评估, 计算式为

$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{J_a - J_m}{J_a} \right|}{n} \times 100\% \quad (12)$$

式中 n ——试验数据点数量

J_a ——水通量计算值, cm/h

J_m ——比率法水通量测量值, cm/h

2 结果与分析

2.1 热电偶探针温度变化

在热脉冲作用下, 测量系统中 4 根等距排布热

电偶探针温度均呈先急剧上升后缓慢下降趋势 (图 4)。在水流静止工况下, 4 根热电偶探针温度变化曲线近似相同, 但未完全重合; 原因为在插入土壤时, 探针间距改变。另外, 在细质土壤中, 热电偶探针温度升高最大值呈逐渐减小且出现时间向后延迟的趋势, 这可能与土壤热特性参数有关; 粗质土壤具有更高的热扩散率和热导率, 导致了更快的热传输速度。当有水流通过试验土壤时, 相对于水流静止工况的以加热探针为中心的对称分布温度场, 温度分布重心向下游偏移; 此时下游探针温度升高值增大, 上游探针温度升高值减小。

2.2 土壤水通量

加热开始后 40 ~ 50 s 的时间段内, T_d/T_u 相对稳

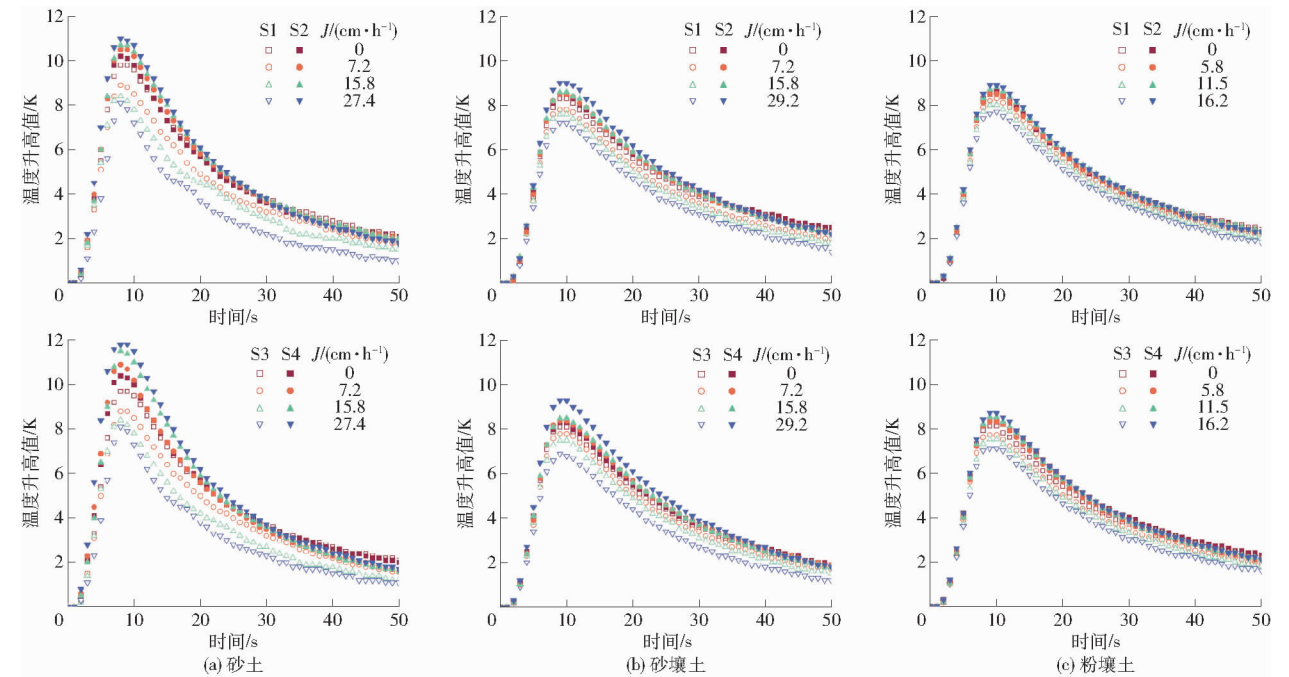


图 4 3 种试验土壤下 4 根热电偶探针温度变化曲线
Fig. 4 Temperature variation curves of four thermocouple probes under three experimental soils

定, 因此选取此段数据计算土壤水通量, 结果如图 5 (纵坐标为比率法在 S1、S2 和 S3、S4 方向上测量的土壤水通量, 横坐标为土柱出水口流量除以土柱截面积计算的水通量乘以 $\cos 45^\circ$, 即实际值) 所示。在 3 种试验土壤中, 比率法水通量测量值与水通量实际值均存在较好的线性相关性 ($R^2 > 0.88$); 其中, 砂土中获得了更好的测量结果, 其测量值接近 1:1 线, 而砂壤土和粉壤土中的水通量测量值被显著低估。在砂土、砂壤土和粉壤土中, 水通量测量值与实际值线性拟合斜率分别为 0.930、0.770 和 0.646, 截距分别为 1.120、-0.364、0.228 cm/h。对比斜率可知, 随着土壤质地变细, 水通量被低估程度逐渐增大。对比 3 种土壤中水通量测量值标准差可知 (表 3), 相对 2 种更粗质地的土壤, 粉壤土展现出更

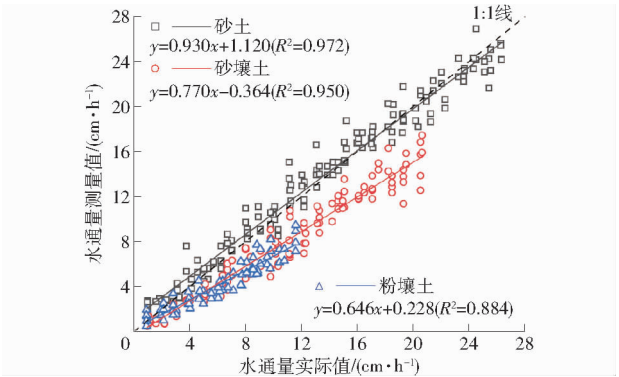


图 5 比率法水通量测量值与水通量实际值对比
Fig. 5 Comparison between water flux measured by ratio method and actual water flux

稳定的测量结果, 这可能与水通量范围不同有关。当水通量大于 4 cm/h 时, 砂土中水通量测量值

表 3 比率法测量水通量和方向平均绝对值百分比误差 (MAPE) 与标准差

Tab.3 Mean absolute percentage error (MAPE) and standard deviation of water flux magnitude and direction using ratio method

质地	水通量/ ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)	水通量		水通量角度	
		MAPE/ %	标准差/ ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)	MAPE/ %	标准差/ ($^{\circ}$)
砂土	1.32 ~ 4.00	64.49	0.89	23.03	13.20
	4.00 ~ 37.22	9.09	1.20	4.96	2.80
砂壤土	1.32 ~ 4.00	39.32	0.43	17.76	9.69
	4.00 ~ 31.12	27.52	1.11	6.18	3.04
粉壤土	1.22 ~ 4.00	32.65	0.52	31.11	14.62
	4.00 ~ 16.35	34.07	0.78	15.06	7.91

MAPE 为 9.09%, 而砂壤土和粉壤土表现出更大的误差,MAPE 分别为 27.52% 和 34.07%。

水通量方向测量结果如图 6 所示。由图 6 可知,在较低水通量下,水通量角度测量值出现较大的不稳定性。以水通量 4 cm/h 为界限,将角度测量值分为 2 组处理。与水通量小于 4 cm/h 工况相比,在砂土、砂壤土和粉壤土中,水通量大于 4 cm/h 角度测量值标准差分别减小 10.40°、6.65° 和 6.71° (表 3);角度测量值随着水通量增加逐渐趋于稳定。其中,在水通量大于 6 cm/h (0.17 K_{sat}) 的砂土和水通量大于 3 cm/h (0.94 K_{sat}) 的砂壤土中,水通量角度测量值比较稳定,其绝对误差在 7.5° 以内。然而,相对于 2 种较粗土壤,粉壤土角度测量值一直存

在较大的波动。当水通量大于 4 cm/h 时,砂土、砂壤土和粉壤土中角度测量值标准差分别为 2.80°、3.04° 和 7.91°,呈随着土壤变细而逐渐增大的趋势。表明随着土壤质地变细,水通量角度测量值呈现出更大的不稳定性。当水通量大于 4 cm/h 时,砂土和砂壤土中角度测量值 MAPE 分别为 4.96% 和 6.18%,粉壤土则呈更大的角度测量误差,MAPE 为 15.06%。

3 讨论

随着水通量增大,采用比率法和矢量合成法测量的水通量角度精度逐渐提高。在细质土壤中,测量水通量角度标准差较大 (例如粉壤土为 7.91°),精度较低 (图 6);角度测量精度与水通量分量测量误差直接相关。试验结果表明,上述水通量大小与方向测量误差与不同质地土壤颗粒构建的土壤孔隙分布与结构有关。在填装土壤中,粗质地砂土具有更大的孔隙和更高的颗粒间摩擦力,从而形成了更稳定的土壤骨架^[31]。这些较大的孔隙提高了土壤导水率,使得水流能够沿水力梯度方向更稳定地流动^[32]。较高的导水率减少了水流测量方向上压力分布不均匀性,降低了水流对土壤骨架的冲击,从而维持了更稳定的水流路径,进而得到较高精度的角度测量值。在砂壤土中,更小的土壤颗粒形成了更复杂的孔隙结构,并且导水率较低^[33];孔隙尺寸不均匀性使水流阻力在测量方向上的分布不均,水流倾向于寻找阻力较小的大孔隙和连通性好的路径流动^[34]。这种水流路径曲折和多变性降低了水通量测量精度进而影响了合成方向测量精度。随着水通量的增大,沿测量方向水力梯度升高,可能导致填装土壤孔隙结构变化,孔隙连通性增加,提高水通量角度测量精度。然而,在更细质的粉壤土中,更低的导水率和更复杂的孔隙结构,增加水通量 (水力梯度) 对沿测量方向的孔隙 (水路) 的连通性影响不显著。

整体上,砂土角度测量精度优于砂壤土,但当水通量小于 8 cm/h 时,砂壤土中的水通量方向测量精度较好。这可能与土壤颗粒粒径与加热探针和测温探针之间的距离有关。由表 1 可知,砂土土壤颗粒与探针间距 (2.5 mm) 几何尺寸在相同数量级上的相对含量更多;表明相对于砂壤土,砂土的探针间距内填充了更少数量且更大尺寸的土壤颗粒。在低通量条件下,水流对土壤骨架的影响较小,填充土壤的随机性基本未受影响^[35]。这使得水流路径受大颗粒土壤的影响更为显著,进而影响了该方向水通量测量和整体角度测量精度。随着水通量增加,高水

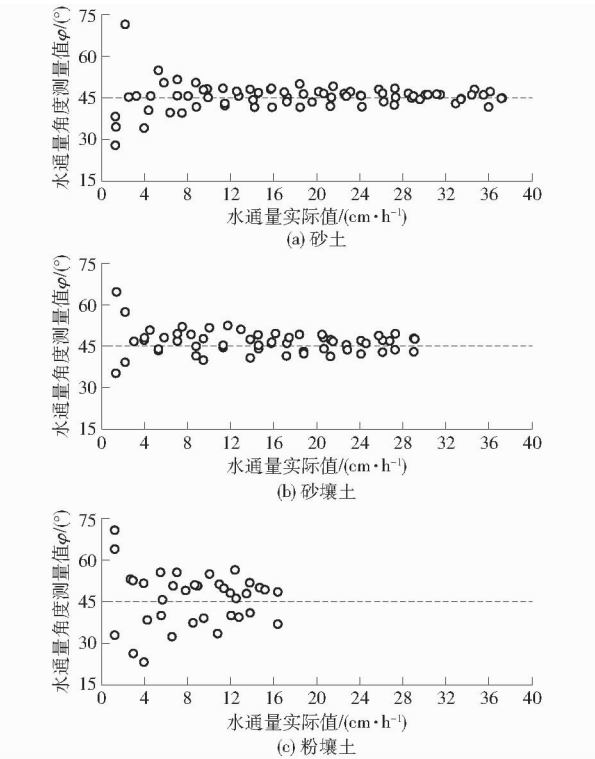


图 6 比率法测量水通量方向

Fig. 6 Water flux direction determined using ratio method

力梯度的水流可能会在小范围内迫使土壤颗粒移动,从而能够减弱土壤颗粒与探针间距几何尺寸效应的影响。因此,根据土壤颗粒级配选择适当的探针间距可能提高比率法测量土壤水通量精度及矢量合成法测量水通量角度的可靠性。

4 结论

(1)在饱和砂土、砂壤土和粉壤土中,随着土壤质地变细,水通量角度的测量精度逐渐下降。当水通量大于 4 cm/h 时,饱和砂土、砂壤土和粉壤土中角度测量值 MAPE 分别为 4.96%、6.18% 和

15.06%。水通量角度测量精度随着水通量增加而提高。与水通量小于 4 cm/h 相比,砂土、砂壤土和粉壤土在水通量大于 4 cm/h 角度测量值标准差分别减小 10.40°、6.65°和 6.71°。

(2)土壤质地是影响比率法测量土壤水通量精度的主要因素。不同质地填装土壤孔隙连通性在不同水通量和水力梯度下存在差异,进而影响了水通量测量精度。另外,土壤颗粒与探针间距几何尺寸关系也会影响比率法测量精度。依据土壤颗粒级配优化 PHPP 探针间距可能提高合成法测量水通量角度的可靠性。

参 考 文 献

[1] 马仪,黄组桂,贾江栋,等. 基于无人机-卫星遥感升尺度的土壤水分监测模型研究[J]. 农业机械学报,2023,54(6): 307-318.
MA Yi, HUANG Zugui, JIA Jiangdong, et al. Soil moisture monitoring model based on UAV-satellite remote sensing scale-up[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 307-318. (in Chinese)

[2] 武强,黄娜,罗孳孳,等. 宇宙射线中子法测量区域土壤水分准确性季节变化研究[J]. 农业机械学报,2022,53(1):321-330.
WU Qiang, HUANG Na, LUO Zizi, et al. Seasonal variations of regional soil moisture measurement accuracy based on cosmic-ray neutron sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 321-330. (in Chinese)

[3] 徐俊增,刘玮璇,卫琦,等. 基于 HYDRUS-2D 的负压微润灌土壤水分运动模拟[J]. 农业机械学报,2021,52(8):287-296.
XU Junzeng, LIU Weixuan, WEI Qi, et al. Simulation of soil moisture movement under negative pressure micro-irrigation based on HYDRUS-2D[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):287-296. (in Chinese)

[4] BANDAI T, GHEZZEHEI T A. Physics-informed neural networks with monotonicity constraints for Richardson-Richards equation: estimation of constitutive relationships and soil water flux density from volumetric water content measurements[J]. Water Resources Research, 2021, 57(2): e2020WR027642.

[5] 魏征,李道西,柳佳奇,等. 石羊河流域水-作物-生态系统耦合协调度时空演变与调控潜力研究[J]. 农业机械学报, 2025,56(8):142-151.
WEI Zheng, LI Daoxi, LIU Jiaqi, et al. Spatiotemporal evolution and regulation potential of water-crop-ecosystem coupling coordination degree in Shiyang River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(8): 142-151. (in Chinese)

[6] 姜浩,张寒博,刘诚斌,等. 基于温度-降水-植被综合干旱指数的长江流域干旱时空动态监测[J]. 农业机械学报,2025, 56(8):95-106,119.
JIANG Hao, ZHANG Hanbo, LIU Chengbin, et al. Spatiotemporal dynamics monitoring of drought in Yangtze River Basin using temperature-precipitation-vegetation integrated dryness index (TPVDI)[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(8):95-106,119. (in Chinese)

[7] ORLOWSKI N, RINDERER M, DUBBERT M, et al. Challenges in studying water fluxes within the soil-plant-atmosphere continuum: a tracer-based perspective on pathways to progress[J]. Science of the Total Environment, 2023, 881: 163510.

[8] 许景辉,王一琛,邵明烨,等. 基于 Pyboard 的土壤水通量测量系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(10):338-344.
XU Jinghui, WANG Yichen, SHAO Mingye, et al. Investigation on soil water flux measurement system based on Pyboard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 338-344. (in Chinese)

[9] CAI J, ZHOU B, CHEN S, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture and its driving factors in the northern agricultural regions of China[J]. Water, 2024, 16(4): 556.

[10] 鲁新蕊,龚元石. 热脉冲技术估算土壤水流通量评价[J]. 土壤学报,2011,48(5):947-956.
LU Xinrui, GONG Yuanshi. Evaluation of soil water flux estimates from heat pulse technique[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5): 947-956. (in Chinese)

[11] SU M, MA R, WANG Y, et al. Tracing the soil water flux in variably saturated zones using temperature data[J]. Water Resources Research, 2023, 59(5): e2022WR033677.

[12] RAU G C, ANDERSEN M S, ACWORTH R I. Experimental investigation of the thermal dispersivity term and its significance in the heat transport equation for flow in sediments[J]. Water Resources Research, 2012, 48(3): W03511.

[13] NARUKE C, SHENG W, ZHOU R, et al. Standardizing heat pulse probe measurements for thermal property determination using ice and water[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308: 108610.

[14] HE H, DYCK M F, HORTON R, et al. Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(4) : 567 – 620.

[15] REN T, KLUITENBERG G J, HORTON R. Determining soil water flux and pore water velocity by a heat pulse technique[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2) : 552 – 560.

[16] WANG Q, OCHSNER T E, HORTON R. Mathematical analysis of heat pulse signals for soil water flux determination[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(6) : 27 – 1 – 27 – 7.

[17] OCHSNER T E, HORTON R, KLUITENBERG G J, et al. Evaluation of the heat pulse ratio method for measuring soil water flux[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3) : 757 – 765.

[18] KLUITENBERG G J, OCHSNER T E, HORTON R. Improved analysis of heat pulse signals for soil water flux determination [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1) : 53 – 55.

[19] HOPMANS J W, ŠIMUNEK J, BRISTOW K L. Indirect estimation of soil thermal properties and water flux using heat pulse probe measurements: geometry and dispersion effects[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(1) : 7 – 1 – 7 – 14.

[20] LU X, CHEN G, QIN Y, et al. Evaluation of water flux prediction with heat-pulse technique in saturated soils[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(4) : 455 – 467.

[21] LU X, SUN Y, CHEN G, et al. Influences of thermal dispersion on soil water flux estimates using heat pulse technique in saturated soils[J]. *Catena*, 2018, 167 : 228 – 235.

[22] MORI Y, HOPMANS J W, MORTENSEN A P, et al. Multi-functional heat pulse probe for the simultaneous measurement of soil water content, solute concentration, and heat transport parameters[J]. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2(4) : 561 – 571.

[23] MORI Y, HOPMANS J W, MORTENSEN A P, et al. Estimation of Vadose zone water flux from multi-functional heat pulse probe measurements[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3) : 599 – 606.

[24] GAO J, REN T, GONG Y. Correcting wall flow effect improves the heat-pulse technique for determining water flux in saturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(3) : 711 – 717.

[25] ENDO A, HARA M. Simultaneous measurement of thermal front advection velocity vector and thermal properties of sandy soil under two-dimensional flow field with Quintuple – Probe Heat – Pulse technique and its application[J]. *Soc. Inst. Contr. Eng. Trans. Ind. App.*, 2003, 2 : 88 – 95.

[26] ENDO A, HARA M. Simultaneous measurement of water flux density vectors and thermal properties under drainage conditions in soils[J]. *Paddy and Water Environment*, 2007, 5 : 171 – 180.

[27] YANG C, SAKAI M, JONES S B. Inverse method for simultaneous determination of soil water flux density and thermal properties with a penta-needle heat pulse probe[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(9) : 5851 – 5864.

[28] WEN M, LIU G, LI B, et al. Evaluation of a self-correcting dual probe heat pulse sensor [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200 : 203 – 208.

[29] REN T, OCHSNER T E, HORTON R, et al. Heat-pulse method for soil water content measurement: influence of the specific heat of the soil solids[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6) : 1631 – 1634.

[30] REN T, NOBORIO K, HORTON R. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(3) : 450 – 457.

[31] LOZANO L A, SORACCO C G, CORNELIS W M, et al. Anisotropy of pore size classes’ connectivity related to soil structure under no tillage[J]. *Soil Science*, 2013, 178(11) : 612 – 617.

[32] BACQ-LABREUIL A, CRAWFORD J, MOONEY S J, et al. *Phacelia* (*Phacelia tanacetifolia* Benth) affects soil structure differently depending on soil texture[J]. *Plant and Soil*, 2019, 441 : 543 – 554.

[33] GUPTA S, BORRELLI P, PANAGOS P, et al. An advanced global soil erodibility (K) assessment including the effects of saturated hydraulic conductivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908 : 168249.

[34] SCHEUERMANN A, BIEBERSTEIN A. Preferential water movement in homogeneous soils[C] // *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Springer Berlin Heidelberg, 2007 : 461 – 473.

[35] MOHAMMADI M H, VANCLOOSTER M. Analysis of flow rate dependency of solute transport in an undisturbed inceptisol [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(1) : 394 – 402.