

# 壤中滴灌条件下植被混凝土水分运移规律

王辰元<sup>1</sup>, 周明涛<sup>2,3</sup>, 胡旭东<sup>1,2</sup>, 章涵<sup>2,3</sup>

(1.三峡大学土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002;2.三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学),湖北 宜昌 443002;3.三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北 宜昌 443002)

**摘要:**以复合人造土壤为研究对象,研究滴头流量、坡度因子对植被混凝土水分运移过程的影响效应,揭示壤中滴灌条件下植被混凝土湿润锋运移动态变化及含水率时空分布特征,探讨植被混凝土与天然土壤在水分运移方面的异同,为高陡边坡生态恢复下壤中滴灌系统的灌溉布局与灌溉制度提供理论参考。结果表明:滴头流量、坡度对垂直向上方向的水分运移影响最大,对水平方向的影响较小。灌水前期,土壤基质吸力的影响远大于重力,水分在垂直方向上的运移距离与水平方向相近;灌水中期,垂直向上与水平方向的渗透速率随坡度增大而变缓;灌水后期,垂直向下的渗透速率逐渐趋于由重力为主要诱使因素的稳定速率;相同灌水量下,流量越小,湿润锋运移距离越远;水分再分布时段,受重力梯度和基质势的综合影响,垂直向下的运移距离最远,水平方向次之,垂直向上最近;含水率等值线呈椭圆形分布,且垂直向下的含水率均大于垂直向上和水平方向的含水率。采用幂函数与二次函数均可拟合植被混凝土湿润锋运移距离与入渗时间的关系,其中幂函数拟合程度更佳( $R^2 > 0.95$ ),但  $R^2$  略小于一般天然土壤,拟合结果扩大了土壤水动力学理论在复合土壤的适用范围。

**关键词:** 植被混凝土; 壤中滴灌; 水分运移; 湿润锋; 含水率

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0173-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.023

## Moisture Migration of Vegetation Concrete Under Buried Drip Irrigation in Soil

WANG Chenyuan<sup>1</sup>, ZHOU Mingtao<sup>2,3</sup>, HU Xudong<sup>1,2</sup>, ZHANG Han<sup>2,3</sup>

(1.College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang,

Hubei 443002; 2.Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China

Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002; 3.Engineering Research

Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002)

**Abstract:** The purpose of this study was to explore the influence of dripper discharge and slope factors on vegetation-concrete moisture migration by using composite artificial soil. The dynamics of wetting front of vegetation concrete and spatial-temporal distribution of soil moisture under buried drip irrigation in soil were studied, and the similarities and differences of moisture transfer between vegetation concrete and natural soil were discussed as well, which could provide theoretical reference for irrigation scheduling of drip irrigation during ecological restoration of high-steep slope. The results showed that dripper discharge rate and slope had the greatest influence on vertically upward moisture migration, but had little impact in horizontal direction. At the earlier stage of irrigation, the influence of soil matrix suction was much greater than that of gravity, and the vertically upward distance of moisture migration was similar to the horizontal distance. During the middle period, the infiltration rate in vertically upward and horizontal directions decreased with the increases of slopes. At the later stage, the vertically downward migration rate gradually tended to be stable, which was mainly induced by gravity. At the same irrigation volume, the smaller the flow rate, the farther the wetting front would migrate. During the period of moisture redistribution, the distance of vertically downward migration was the farthest, followed by horizontal direction, and vertically upward distance was the nearest. The contours of moisture content were oval, and vertically downward moisture content were larger than

收稿日期: 2021-08-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC05049-02); 中国华电集团公司科研基金项目(121JD201800018)

第一作者: 王辰元(1996—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事边坡防护与生态修复研究。E-mail: wcy@ctgu.edu.cn

通信作者: 周明涛(1979—), 男, 湖北保康人, 教授, 博士, 主要从事边坡防护与生态修复研究。E-mail: zmt@ctgu.edu.cn

those in vertically upward and horizontal direction. Both power and quadratic functions could fit the relationship between the distance of wetting front migration and infiltration time, of which power function was better ( $R^2 > 0.95$ ), but  $R^2$  was slightly smaller than that of natural soil, which expanded the application scope of Soil Hydrodynamics in the composite soil.

**Keywords:** vegetation concrete; buried drip irrigation in soil; moisture migration; wetting front; moisture content

边坡生态修复领域中,植被混凝土生态护坡技术<sup>[1]</sup>是一种以复合人造土壤为介质,采用喷播方式修复边坡植被的高新技术,其所营造的半刚性基质层既可为边坡植物繁育创造生境条件,又可增强生态系统固碳能力及林草碳汇能力<sup>[2]</sup>,充分响应了国家碳中和的号召。植被混凝土的配制方式与施工手段现已成熟,但后期养护管理技术仍存在诸多弊端,尤其是灌溉措施尚不成熟。目前养护管理多以地表喷灌为主,但坡面凹凸起伏较大,喷灌射流因凸起面的阻挡而无法覆盖所有凹下面,进而遗漏出一定范围的灌溉死角,此范围内的植物生长便因缺水而严重受限。若不合理利用水资源,不仅造成巨大经济损失,更影响边坡生态重建的进程,而运用滴灌技术可保证灌溉水的高效利用。而滴灌按灌溉方式分为地表滴灌和地下滴灌,为减轻地表水蒸发的影响,将滴头埋设于喷播在高陡坡面上的植被混凝土基材中,将该滴灌方式称之为壤中滴灌。需掌握壤中滴灌条件下植被混凝土的水分运移规律,为边坡生态修复助力碳中和发展提供科学理论依据。

近些年,国内外学者对不同类别土壤的水分运移和含水率时空变化做出了较多的研究。土壤水分运移方面,Cai 等<sup>[3-4]</sup>通过室内试验和 HYDRUS-2D 软件探究了不同质地土壤对陶瓷灌水器入渗特性的影响,结果显示,对于渗透性强、饱和含水率低的砂土而言,湿润锋呈椭圆形,而渗透性较弱、饱和含水率高的黏土,湿润锋呈圆形,粉质黏土、砂质黏土和黏土的累计入渗量较小,基质势对土壤水的渗透作用随黏土含量的增加而增大,而重力梯度对水的渗透作用随黏土含量增加而减小;钟韵等<sup>[5]</sup>研究了 5 个因子对黏壤土毛管水运动特性的影响,试验得出对毛管水上升高度的影响程度由大到小依次为时间、初始含水率、黏粒含量、土壤容重、地下水埋深。含水率时空变化方面,冀荣华等<sup>[6]</sup>利用 HYDRUS-3D 有限元模型探讨初始压力水头和土壤质地(砂土、壤土、黏土)对水分入渗的影响,结果显示,土壤含水率和水分扩散速率随土壤黏粒含量的增大而减小;王炳尧等<sup>[7]</sup>用直插式地下灌溉的方式研究了砂土、砂黏土湿润体特征值的变化规律,研究表明,垂直向上湿润距离与滴头流速呈负

相关,与灌水时间呈正相关,水平与向下湿润距离与流速、灌水时间呈均正相关。此外,有学者进一步探究了滴灌模式下的土壤水再分布规律,Gardner 等<sup>[8]</sup>通过  $\gamma$  射线衰减法测量再分布时段的土壤水分含量,推导出描述初始湿润锋上方含水量随时间变化的非饱和流动方程的近似解;Skaggs 等<sup>[9]</sup>运用 HYDRUS-2D 软件模拟停止滴灌后的水分再分布特征,为完善滴灌制度提供了科学指导。

目前,有关滴灌条件下水分运移规律的研究对象以天然土壤为主,内容包含灌溉参数、湿润锋运移、数值模拟、水分再分布规律等<sup>[3-9]</sup>,且研究多应用于平缓地面(农田、耕地及部分工程开采区)<sup>[10-12]</sup>。有别于天然土壤,前人<sup>[13-15]</sup>已对植被混凝土在空间结构、颗粒级配、理化性质等方面的特殊性做了相应探究,但鲜有关植被混凝土一类的复合人造土水分运移方面的研究。为更好指导边坡生态修复工程后期的灌溉养护工作,鉴于以上研究背景,本文结合前人得出的相关结论,以土壤水动力学理论为基础,通过不同坡度、流量的点源滴灌试验来指明植被混凝土水分运移规律,为边坡生态修复工程的植被混凝土壤中滴灌系统的灌溉布局与灌溉制度提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验材料:试验原材料包括种植土、有机物料、水泥、植被混凝土绿化添加剂和水。选自宜昌某土场保水性较好的砂质粉土,取回后风干、粉碎,过 2 mm 细筛,取筛后土作为试验种植土。有机物料选用松树锯末,烘干后过 2 mm 细筛,测得干密度为  $0.45 \text{ g/cm}^3$ 。水泥为 P.O 32.5 普通硅酸盐水泥,测得干密度为  $3.10 \text{ g/cm}^3$ 。植被混凝土绿化添加剂为发明专利产品,利用 X 射线衍射仪分析其矿物组成,亲水性矿物质量占比 18%,呈酸性,用于中和水泥碱性。水源自市政自来水。将以上试验材料按《水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范》<sup>[16]</sup>的规定指标及要求均匀混配成植被混凝土(种植土、水泥、锯末、植被混凝土绿化添加剂干质量比为 100 : 8 : 6 : 4)。

选择长、宽、深分别 1,1,0.5 m 的透明装配式土

箱,土箱正壁面可拆卸,采用马氏瓶供水,容积选择 3 L,滴头选用医用针头,滴灌管为透明软水管,一端连接马氏瓶,另一端连接滴头。为确保湿润锋不接触周边界面而影响观察,土箱正面的中部偏上位置设有小孔,将滴头穿过小孔,埋于土中。将拌制好的植被混凝土按容重  $1.5 \text{ g/cm}^3$  每 5 cm 高度分层、打毛、压实装入土箱内,以保证紧密接触,待装满后封住土箱顶面以减少水分蒸发,养护 24 h。试验前,将含水率控制在 8.0%。为方便描述,对供试土样建立直角坐标系,选取最能反映壤中滴灌所能到达最大距离的 3 个运移方向:以小孔为坐标系原点,水平方向为  $x$  轴(向右为正),垂直于  $x$  轴且顺土箱正面方向为  $y$  轴(向上为正),记录  $x$  轴为 HD、 $y$  轴垂直向上为正半轴 UW、 $y$  轴垂向下方向为负半轴 DW。具体试验装置见图 1。

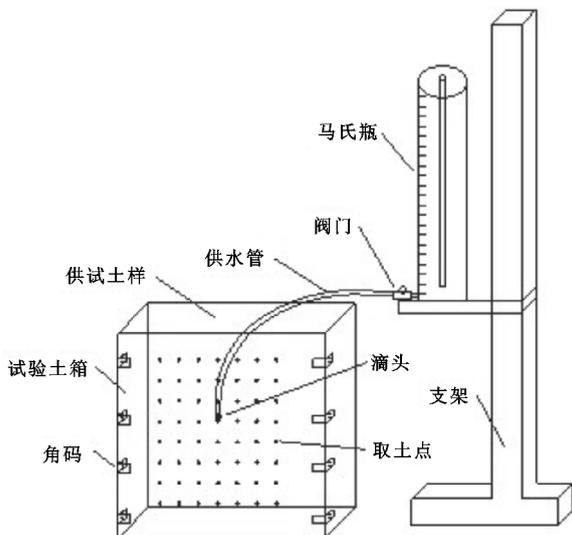


图 1 壤中滴灌试验装置示意

试验土壤:测得砂质粉土比重  $2.6 \text{ g/cm}^3$ ,最大干密度  $1.60 \text{ g/cm}^3$ ,饱和导水率  $0.35 \text{ mm/min}$ ,液限 31.4%,塑限 17.2%,最优含水率 18.5%。采用激光粒度分析仪测定混配后的植被混凝土颗粒组成,粒径  $\leq 0.25, >0.25 \sim 1, >1 \sim 2.8 \text{ mm}$  的体积占比分别为 33.77%,45.95%,20.28%。根据工程实践得知,植被混凝土的初始含水率多保持在 8.0%,因此配制初始含水率为 8.0%的试样,利用烘干法测得植被混凝土饱和含水率为 28.7%。测定试样的方法遵循 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[17]</sup>中的规定。

## 1.2 试验方法

试验方法及测定:试验于 2021 年 5 月 25 日至 7 月 30 日于三峡大学生态基材实验室进行,试验设置 3 个滴头流量处理,分别为 0.8,1.2,1.6 L/h,3 个坡度处理,分别为  $50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ ,流量由马氏瓶底部的阀门调控,坡度通过土箱与地面的夹角调控。在土箱正壁面放置摄像头记录滴灌期间及灌水后湿润锋的运

移距离,前 30 min 内每 5 min 记录 1 次,自 30 min 起至滴灌结束的时间间隔均为 15 min,滴灌结束 24 h 后,记录再分布时段湿润锋运移情况。利用 Photoshop 选区得到湿润体表面形状,其中 HD 的运移距离取左右方向的平均值。灌水结束后,迅速放平土箱,揭开土箱正壁面,以滴头为原点,在水平、垂直方向各间距 50 mm 的点位和湿润锋的边缘位置,用半径 10 mm 的土钻采集土样,烘干法测量土样含水率,利用 Surfer 11.0 软件制作含水率等值线图。

湿润体表面锋线轮廓采用抛物线和椭圆模型进行拟合。

(1) 抛物线拟合模型:

$$y = \mu \cdot x^2 + \delta = x \cdot \tan \theta \quad (1)$$

$$\mu \cdot x^2 - x \cdot \tan \theta + \delta = 0 \quad (2)$$

式中: $x, y$  为湿润锋在滴头 HD 和垂直方向的运移距离( $x, y > 0$ ); $\mu, \delta$  为抛物线模型参数; $\theta$  为轮廓上的点和坐标原点的连线与  $x$  轴的夹角。

(2) 椭圆拟合模型:

$$a \cdot x^2 + b \cdot (y - c)^2 = 1 \quad (3)$$

式中: $x, y$  同式(1); $a, b, c$  为椭圆模型参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿润锋运移

湿润锋作为将已均匀湿润的入渗层与完全未经入渗土层分开的界面,能反映土壤湿润体的特征,也是滴灌布局的重要设计依据,为此研究不同灌水参数下湿润锋在 3 个方向上的运移距离与入渗时间的关系。

2.1.1 不同滴头流量对湿润锋运移过程的影响 首先研究不同滴头流量对湿润锋的关系,为保证能呈现一定的渗流规律,控制坡度一定,设置灌水量 2.4 L(3 种流量 0.8,1.2,1.6 L/h 的公倍数),灌水历时分别为 3,2,1.5 h。为去除重力分力干扰,选取  $90^\circ$  坡度,图 2 表示 3 种流量的湿润锋在 UW、DW 和 HD 的运移距离与入渗时间的关系。

由于土壤的各向异性使得水分向各方向渗透,初期阶段(0~5 min),0.8,1.2,1.6 L/h 3 种流量在不同方向的湿润锋运移距离均相近,分别在 51,57,63 mm 左右。前期阶段(5~25 min),相同流量下湿润锋在 3 个方向的运移距离随时间均呈递增趋势,由于灌水期间重力梯度恒定,而土壤吸力梯度逐渐变小导致增速逐渐变缓;相同方向上运移距离随流量增加而增大,且各流量存在较大运移距离差值发生在中期阶段(30~60 min)。后期阶段(60 min 后),对于同一时刻,0.8 L/h 运移距离最小,1.6 L/h 运移距离最大。待各流量滴灌结束后,相同灌水量下,0.8 L/h

运移距离最大,1.6 L/h 运移距离最小。

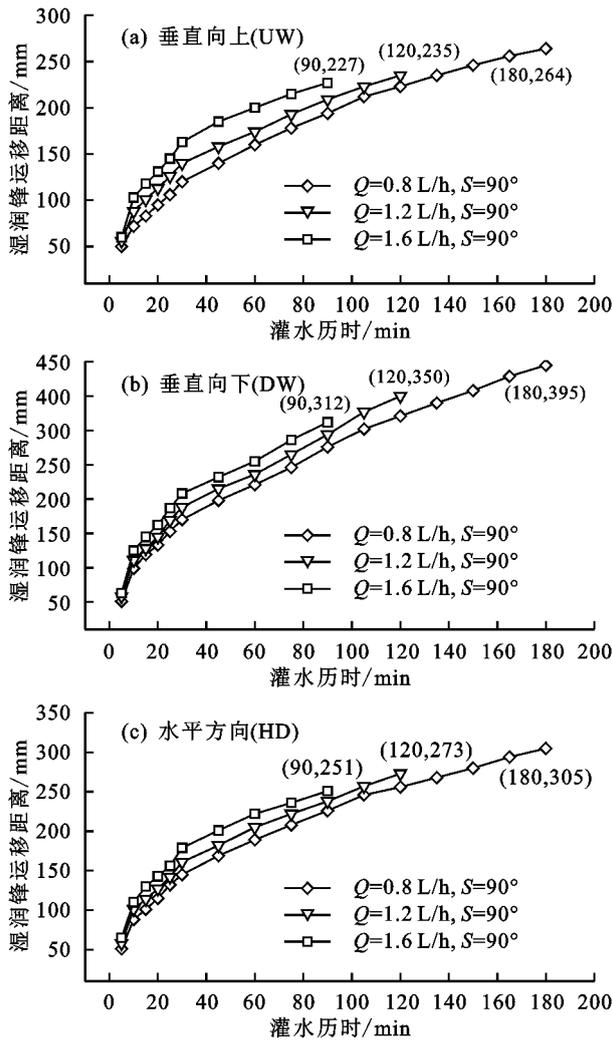


图 2 不同方向湿润锋运移距离与入渗时间的关系

90 min 时,1.6 L/h 的土样滴灌结束,此时记录不同流量下湿润锋的运移距离见表 1。由表 1 可知,随流量的增大,各方向的运移距离均增大,且  $Q=1.6$  L/h 的运移距离最大。90 min 内,同流量条件下湿润锋运移距离均呈现  $DW > HD > UW$  的特征。在 0.8~1.2 L/h 和 1.2~1.6 L/h 的流量区间内发现,流

表 1 灌水 90 min 时不同方向湿润锋运移距离及流量、方向区间对应的距离增幅

运移方向	湿润锋运移距离/mm			流量区间对应的距离增幅/%		方向区间对应的距离增幅/%		
	0.8 L/h	1.2 L/h	1.6 L/h	0.8~1.2 L/h	1.2~1.6 L/h	HD-DW	UW-DW	UW-HD
UW	194.3	208.9	227.3	7.7	8.6	22.1	42.3	16.5
DW	276.1	294.4	311.9	6.5	6.2	23.5	40.7	13.9
HD	226.0	238.2	250.6	5.3	5.5	24.3	37.4	10.6

3 h 后结束灌水,此时不同坡度下湿润锋的运移距离见表 2。由表 2 可知,90° DW 的湿润锋运移距离最大,90° UW 距离最小;70° 和 90° DW 的运移距离差值最大,70° 和 90° HD 的差值最小;从 2 个坡度区间对应的距离增幅分析可知,坡度变化对 UW 的水分运移影响最大,对 HD 的影响最小。

量变化对 UW 的影响最大,距离增幅最大值出现在 UW 的 1.2~1.6 L/h 流量区间上,最小值出现在 HD 的 0.8~1.2 L/h 流量区间上,但总体上各方向上的流量区间增幅均相近,UW、DW、HD 上流量区间对应的距离增幅平均值分别为 8.2%、6.4%、5.4%。在运移方向区间内,各流量下 HD-DW、UW-DW、UW-HD 对应的距离增幅平均值为 23.3%、40.1%、13.7%,其中 UW-DW 区间对应的距离增幅约是 UW-HD 区间的 3 倍。随着土壤平均吸力梯度不断减小,土壤基质势影响程度减弱,HD 的运移距离速率降低,而在垂直方向上的 UW、DW 主要受土壤水重力影响,重力阻碍 UW 的运移,而促进 DW 的运移。

2.1.2 不同坡度对湿润锋运移过程的影响 植被混凝土应用于 45° 以上的高陡边坡,坡度的陡缓程度直接影响坡面 UW、DW 的水分运移距离情况,因此需研究坡度对植被混凝土土壤中渗流的变化规律。为直观反映规律,选择长灌水历时的 0.8 L/h 流量、2.4 L 灌水量组合,研究 50°,70°,90° 对植被混凝土湿润锋运移距离的影响(图 3)。

坡度不同的条件下,由湿润锋在 3 个方向上的运移距离与渗流时间关系(图 4a、4b、4c)可知,湿润锋运移距离在方向上均表现为  $DW > HD > UW$ ; UW 情况下,50° 的运移距离最大,90° 最小;DW 上 90° 最大,50° 最小;HD 上 50° 最大,90° 最小。从整个滴灌过程来看,灌水初期(0~5 min),不同方向下的各坡度湿润锋运移距离均为 50~55 mm;自灌水开始,UW 与 DW 下的各坡度运移距离在 10~15 min 开始有较明显的距离差;自灌水中期(30 min)起,UW 与 HD 的渗透速率随坡度增大而变缓,而 DW 的渗透速率变快,其中 HD 下 50° 与 70° 的运移速率陡增,以大于同时刻 90° 的渗透速率向外扩散,直至灌水结束,最后呈现 50° 运移距离最大,90° 最小的结果。

前人采用幂函数<sup>[18-20]</sup>、二次函数<sup>[21-22]</sup>、指数函数<sup>[23-24]</sup>、对数函数<sup>[25]</sup>拟合了不同灌水条件下天然土壤的湿润锋运移距离与入渗时间、灌水量、含水率等关系规律。由于对数函数拟合属于极端条件下的拟合<sup>[25]</sup>,因此运用幂函数、二次函数、指数函数对 2.4 L 灌水量、0.8 L/h 流量、90° 坡度下的水分运移距离与

入渗时间关系进行拟合(表 3)。研究发现,采用幂函数拟合,其决定系数均达到 0.95 以上,经检验,回归结果极显著。而采用二次函数拟合,决定系数在 0.9 左右。由此表明,幂函数、二次函数都能反映壤中滴灌下植被混凝土湿润锋运移距离与入渗时间的关系,但幂函数拟合程度更高。

### 2.2 湿润体运移规律及含水率分布

前人<sup>[26-29]</sup>对地下滴灌条件下湿润体表面形状的研究发现,不同类型的物理性质存在差异,容重大的土壤非饱和和导水率大,入渗速率不同,所形成的湿润体表面形状有椭圆、圆、抛物线等。本试验研究的湿润体表面(图 3)以抛物线和椭圆模型进行拟合。

为方便探究湿润锋特征规律,选用小流量 0.8 L/h 和大灌水量 2.4 L 的灌水方式,保证灌水时间尽可能长。基于已建立好的  $x, y$  坐标系,以滴头下方湿润锋运移为例,选取表 4 中 0.8 L/h 流量时 DW、HD 的幂函数关系式  $x=2.813t^{0.463}, y=0; x=0, y=$

$2.948t^{0.503}$  代入算得 DW 的运移距离。

(1) 抛物线拟合模型:

$$y = \frac{\tan^2 \theta + \tan \theta \cdot \sqrt{\tan^2 \theta + 4.395t^{0.079}}}{0.745t^{-0.4231}} \quad (4)$$

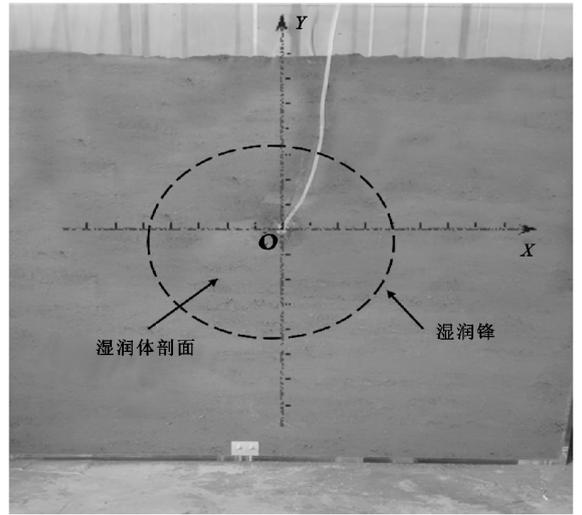


图 3 以 90° 坡度为例的某时刻下湿润体表面及湿润锋示意图

(2) 椭圆拟合模型:

$$y = \frac{(8.383t^{0.040} + 8 \tan^2 \theta) \cdot (2.948t^{0.503} + 2.813t^{0.463})^2 - 4.193t^{0.040} (2.948t^{0.503} - 2.813t^{0.463})^2}{4.193t^{0.040} + 4 \tan^2 \theta} \quad (5)$$

现给定夹角  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ , 把  $\theta$  值与测得的灌水时间  $t$  代入公式(4)和公式(5)中, 设实测值为自变量  $p$ , 模拟值为因变量  $q$ , 对 2 个模型算得的 DW 距离值和实测值线性拟合(表 4)表明, 抛物线和椭圆模型拟合程度均较好, 而椭圆模型的  $R^2 > 0.95$ , 经检验, 回归结果极显著, 说明椭圆形更适合模拟湿润体表面形状, 可模拟和表征植被混凝土水分运移动态变化。

现对湿润体含水率分布情况进行探究, 选用 2.4 L 的灌水量, 灌水结束后迅速测定 0.8, 1.2, 1.6 L/h 的质量含水率, 并制作含水率等值线图(图 5)。

考虑到复合土壤质地不均, 水泥与矿物成分遇水发生化学反应导致理化性质改变等影响, 含水率边界呈现凹凸分布, 但在基质势和重力势的综合影响下, 总体上呈现出 3 种流量的含水率等值线图均为椭圆形, 与湿润锋的分布规律相同, 验证了椭圆模型模拟的可行性。同时发现, 距离滴头越近, 土壤含水率越高, 梯度变化越缓; 距滴头相等的位置, DW 的含水率均大于 UW 和 HD; 且在灌水量一定的情况下, 流量越小, 湿润体表面越大。

### 2.3 湿润体水分再分布

在灌水结束后的 24 h 内, 湿润到接近饱和程度的土层并未一直保持其全部含水量, 水分依然受重力与土壤水吸力的影响下向周围扩散, 属于水分再分布时段。停灌后的水分再分布和灌水期间的水分分布同样重要, 尤其在极度缺水的地区, 停灌后的水分仍保持扩散, 补足植物所需的营养。为此, 研究了在 90° 坡度、2.4 L 灌水量条件下 3 种流量的水分再分布规律(图 6)。

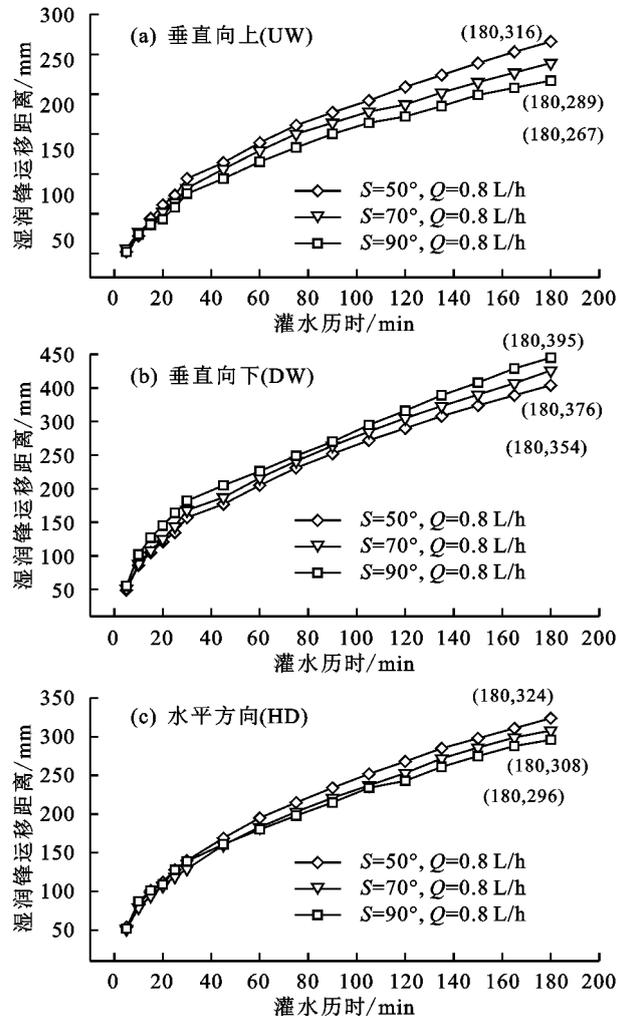


图 4 不同方向下各坡度湿润锋运移距离与入渗时间的关系

结束灌溉后 24 h, 90°坡度、2.4 L 灌水量条件下, 0.8 L/h 灌水 3 h, 灌溉的最远距离为 432.7 mm, 最近距离为 280.3 mm; 1.2 L/h 灌水 2 h, 灌溉的最远距离为 391.1 mm, 最近距离为 248.2 mm; 1.6 L/h 灌水 1.5 h, 最远距离为 372.4 mm, 最近距离为 247.5 mm, 呈现 DW 的运移距离最远, HD 次之, UW 最近的现象。同时, UW、DW 和 HD 在 3 种流量下再分布时段的运移距离分别占总距离的 5.8%, 8.9%, 9.5%, 8.7%, 9.7%, 14.3% 和 4.2%, 8.3%, 13.4%, 发现在停灌后, DW 的运移距离占比较其余两方向的大; 灌水时段滴头流量越大, 各方向上的湿润锋运移距离越小; 灌水结束后的 24 h 内, 不同滴头流量湿润锋在 UW、DW 和 HD 的运移距离都相应增大, 且流

量越大, 湿润锋运移距离的增幅越大, 其中 DW 的湿润锋距离增幅最大, UW 与 HD 对应的再分布运移距离相当。

研究表明, 受重力梯度和基质势的综合影响, 滴灌阶段和再分布阶段的水分在 DW 的距离增量, 增幅均大于 UW、HD。相较于灌水时段的水分运移速率, 再分布时段的速率明显变缓。

表 2 不同坡度下湿润锋运移距离及坡度区间对应距离增幅

运移方向	湿润锋运移距离/mm			坡度区间对应的距离增幅/%	
	50°	70°	90°	50°~70°	70°~90°
UW	316.3	289.2	267.4	-8.5	-7.6
DW	354.1	376.0	394.8	6.2	5.9
HD	324.1	307.9	296.2	-4.9	-3.9

表 3 湿润锋距离(D)与入渗时间(t)的函数拟合

运移方向	流量/(L·h <sup>-1</sup> )	$D=at^b$			$D=at^2+bt+c$				$D=ae^{bt}$		
		a	b	R <sup>2</sup>	a	b	c	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
VU	0.8	2.413	0.464	0.996	-0.002	0.364	5.688	0.912	9.119	0.012	0.812
	1.2	3.314	0.408	0.978	-0.001	0.253	6.267	0.877	8.739	0.009	0.793
	1.6	3.424	0.435	0.961	-0.001	0.202	5.394	0.902	8.055	0.008	0.821
VD	0.8	2.948	0.503	0.987	-0.002	0.470	6.781	0.921	10.468	0.014	0.787
	1.2	3.157	0.502	0.979	-0.001	0.342	7.330	0.902	10.362	0.012	0.779
	1.6	3.378	0.507	0.965	-0.001	0.283	7.658	0.887	11.058	0.008	0.865
HD	0.8	2.813	0.463	0.981	-0.002	0.397	5.689	0.931	9.119	0.012	0.781
	1.2	3.367	0.436	0.970	-0.001	0.242	6.314	0.907	8.735	0.009	0.820
	1.6	3.428	0.458	0.957	-0.001	0.211	5.738	0.875	8.055	0.008	0.857

表 4 不同夹角(θ)的 DW 湿润锋模拟值与实际值拟合

夹角(θ)/(°)	拟合模型	线性方程	相关系数(R <sup>2</sup> )
30	抛物线	$q=1.043p-0.221$	0.917
	椭圆	$q=0.992p+0.136$	0.965
45	抛物线	$q=1.022p+0.122$	0.923
	椭圆	$q=1.012p-0.088$	0.988
60	抛物线	$q=0.987p+0.198$	0.930
	椭圆	$q=1.033p+0.251$	0.975

### 3 讨论

灌水前期, 当水分刚入渗至干土, 基质吸力远大于重力(重力影响相对可忽略), 因此水分在 DW 和 UW 运移时, 主要受土壤基质吸力影响, 与 HD 的水分运移距离相近。灌水中期, 由于植被混凝土的大颗粒含量高, 非饱和含水率低, 只有交界面的压力水头增大到足以使水进入并填充砂质粉土的大孔隙时, 水才能进一步入渗, 因此不同流量所需时间不同, 导致运移距离相差较大。灌水后期, DW 逐渐以均匀速率渗透, 随着水分进一步入渗, 表面湿润体不断扩大, 土壤平均吸力梯度需不断减小, 才可使压力水头

差分摊到更远的距离, 直到减小至可以忽略的程度, 剩下数值固定的重力梯度作为促使水分向下运移的唯一驱动力。

植被混凝土含有矿物成分, 前期水分接触亲水性矿物, 使其饱和并发生形变, 同时水泥的水化反应生成了碳酸钙等孔隙较大的晶体, 二者导致土体内部孔隙增多。加之反应过程放热, 水分子运动加剧, 运移速率增大。灌水结束后, 90°下的土壤水重力无分力影响, 且与 DW 土壤基质吸力方向一致, 二力共同牵引水分顺 DW 运移, 致使 90°的 UW 和 HD 湿润锋运移距离相对较小。植被混凝土是复合人造土, 水泥和矿物组分的干扰无法避免, 且复杂的土壤制备工序亦会影响土壤颗粒孔隙的均匀性, 这些因素均导致一定范围内的土壤水基质势存在差异, 从而增大了水分运移的各向异性。

蔡耀辉等<sup>[18]</sup>拟合了黏壤土地下滴灌条件下湿润锋运移距离与时间的变化关系, 其决定系数接近 1。Al-Naem<sup>[19]</sup>和张建丰等<sup>[20]</sup>研究表明, 砂土和沙壤土在 HD 和垂直方向上湿润锋运移距离均与时间成幂函数关系, 且  $R^2=0.99$ 。而本文关于植被混凝土土壤

中滴灌条件下湿润锋运移距离与时间拟合的决定系数略小于蔡耀辉等<sup>[16]</sup>的研究结果,综合土壤组分影响,水分运移受一定阻碍,因此所得研究结果符合实

际情况。本文的研究结果证明植被混凝土的水分运移亦可用幂函数拟合,扩大土壤水动力学理论在复合土壤的适用范围。

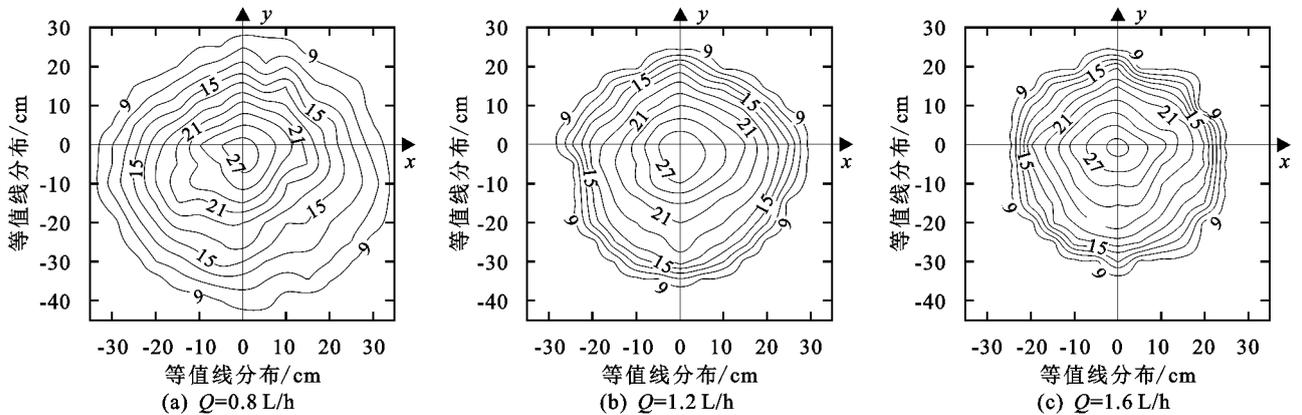


图 5 不同流量含水率等值线

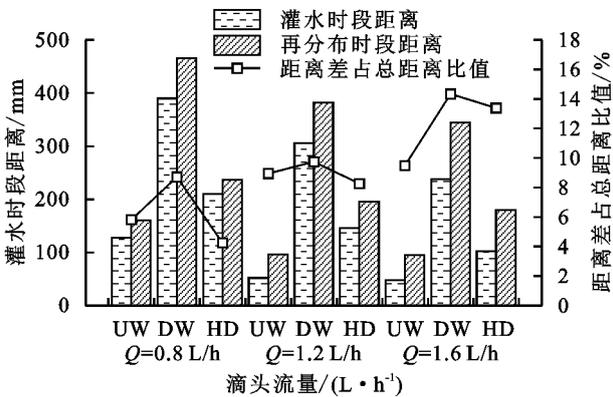


图 6 滴灌时段与再分布时段湿润锋运移情况

渗透率是容重的直观表征,土壤容重越大,渗透率越高,运移距离越远。由《水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范》(NB/T 35082—2016)<sup>[16]</sup>可知,植被混凝土的容重指标(1.3~1.7 g/cm<sup>3</sup>)虽与天然土壤相近,但其组分使部分水分发生反应。此外,本文对流量、坡度因子植被混凝土水分运移规律进行了内在分析,未考虑植物蒸腾、植物根系吸水、地表蒸发等潜在影响因子。在实际边坡防护工程中,应基于天然土的滴灌布局与灌水制度,对植被混凝土的滴灌布局提出多维度建议。

## 4 结论

(1)灌水前期,基质吸力远大于重力,水分在垂直方向上的运移距离与水平方向相近;灌水中期,垂直方向上与水平方向的渗透速率随坡度增大而变缓;灌水后期,垂直向下的渗透速率逐渐趋于由重力为主要诱因的稳定速率。

(2)幂函数与二次函数均可拟合植被混凝土的湿润锋运移距离与入渗时间的关系,其中幂函数拟合效果更佳,但两者的拟合效果均低于一般天然土壤。椭圆形更适合模拟湿润体表面形状,模型值与实测值拟

合后  $R^2 > 0.95$ ,可模拟和表征植被混凝土水分运移动态变化。

(3)坡度变化对垂直向上的水分运移影响最大,对水平方向的影响最小。相同灌水量下,流量越小,湿润锋运移距离越远;距离滴头越近,土壤含水率越高,梯度变化越缓;含水率等值线呈椭圆形分布,且垂直向下的含水率均大于垂直向上和水平方向的含水率。研究结果为高陡边坡生态恢复的壤中滴灌系统的灌溉布局与灌溉制度提供理论参考。

## 参考文献:

- [1] 周明涛,许文年,夏栋.向家坝水电站工程扰动区不同类型边坡土壤酸碱度与肥力分析[J].应用生态学报,2010,21(4):1031-1037.
- [2] 郭义强.生态保护修复有助于碳中和[J].资源与人居环境,2021(4):52-53.
- [3] Cai Y H, Wu P T, Zhang L, et al. Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter[J].Agricultural Moisture Management, 2017,192:244-256.
- [4] Cai Y H, Zhao X, Wu P T, et al. Effect of soil texture on water movement of porous ceramic emitters: A simulation study[J/OL].Water,2019,11(1). DOI:10.3390/w11010022.
- [5] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.多因素影响下土壤上升毛管水运动特性 HYDRUS 模拟及验证[J].农业工程学报,2018,34(5):83-89.
- [6] 冀荣华,刘秋霞,陈振海,等.基于 HYDRUS-3D 模型的微润灌溉土壤水分入渗模拟[J].农业机械学报,2017,48(增刊 1):290-295.
- [7] 王炳尧,韦伟,刘立超,等.直插式地下滴灌土壤湿润体特征值变化规律及灌溉效果分析[J].灌溉排水学报,2019,38(4):1-10.

- [8] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post-irrigation movement of soil water: 1. Redistribution[J]. *Moisture Resources Research*, 1970, 6(3): 851-861.
- [9] Skaggs T H, Trout T J, Simunek J, et al. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130(4): 304-310.
- [10] Sun L B, Chang X M, Yu X X, et al. Effect of freeze-thaw processes on soil water transport of farmland in a semi-arid area[J]. *Agricultural Moisture Management*, 2021, 252: e106876.
- [11] Zhao P, Tang X Y, Zhao P, et al. Mixing of event and pre-event water in a shallow Entisol in sloping farmland based on isotopic and hydrometric measurements, SW China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(19): 3478-3493.
- [12] 王强民,董书宁,王皓,等.西部风沙区采煤塌陷地裂缝影响下的土壤水分运移规律及调控方法[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1532-1540.
- [13] Zhao B Q, Xia L, Xia D, et al. Effect of cement content in vegetation concrete on soil physico-chemical properties, enzyme activities and microbial biomass [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2018, 17(4): 1065-1075.
- [14] Li C, Zhao S Y, Zhou H Q, et al. A review of research progress of vegetation concrete on coastal highway slope [J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 94(S1): 367-371.
- [15] 刘大翔,高贤,许亚坤,等.施加生物炭对植被混凝土理化性质及狗牙根生物量的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(1): 1-14.
- [16] 国家能源局.水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范 NB/T 35082—2016[S].北京:中国电力出版社,2016.
- [17] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准 GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [18] 蔡耀辉,吴普特,张林,等.微孔陶瓷渗灌与地下滴灌土壤水分运移特性对比[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 242-249.
- [19] Al-Naeem M A. Use of pulse trickles to reduce clogging problems in trickle irrigation system in Saudi Arabia[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2008, 11(1): 68-73.
- [20] 张建丰,杨潇,帖西宁,等.深层坑渗灌不同开孔方式单点土壤入渗特性研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 80-88.
- [21] 郝瑞,施斌,曹鼎峰,等.基于 AHFO 技术的毛细水运移模型验证试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(2): 376-382.
- [22] 李涛,张建丰,程慧娟,等.深层坑渗灌田间单点入渗湿润锋分布特性及拟合模型研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(4): 36-39, 45.
- [23] Budd C J, Stockie J M. Multilayer asymptotic solution for wetting fronts in porous media with exponential moisture diffusivity[J]. *Studies in Applied Mathematics*, 2016, 136(4): 424-458.
- [24] Assouline S, Selker J. Introduction and evaluation of a Weibull hydraulic conductivity-pressure head relationship for unsaturated soils [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(6): 4956-4964.
- [25] 王承书,杨晓楠,孙文义,等.极端暴雨条件下黄土丘陵沟壑区土壤蓄水能力和入渗规律[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 296-306.
- [26] Taghavi S A, Marino M A, Ralston D E. Infiltration from trickle irrigation source [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1984, 110(4): 331-341.
- [27] 苏李君,蔺树栋,王全九,等.土壤水力参数对点源入渗湿润体形状的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1): 264-274.
- [28] 何振嘉,傅渝亮,王博,等.涌泉根灌不同浓度肥液入渗特性及土壤湿润体模型研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(24): 90-99.
- [29] Clemmens A J. A statistical analysis of trickle irrigation uniformity[J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(1): 169-175.