

库布齐沙地滴灌人工林土壤水分运移及其与土壤分形特征的关系^①

孙凯¹, 王涵¹, 孙贵荣², 阿拉腾苏和², 杨建军², 王海超¹, 裴志永^{1*}

(1 内蒙古农业大学能源与交通工程学院, 呼和浩特 010018; 2 内蒙古鄂尔多斯市造林总场, 内蒙古树林召 014300)

摘要:以典型人工林为研究对象, 基于激光粒度衍射法测得土壤粒径分布并计算单重及多重分形维数, 通过大田试验明确灌水及水分再分布过程湿润锋动态变化规律, 并采用通径和冗余分析等手段探究湿润锋运移与分形特征的联系。结果表明: ①库布齐沙地滴灌人工林湿润锋水平及垂向运移可分别用对数函数($R^2=0.941 \sim 0.990$)和幂函数($R^2=0.958 \sim 0.996$)描述; ②在砂粒占比高于70%、黏粒占比低于2.5%土壤条件下, 利用粉粒、黏粒含量构建的多元回归模型能较好地计算停灌后二维水分运移距离($R^2=0.839 \sim 1.000$), 但对停灌前适用性较差($R^2=0.243 \sim 0.403$); ③单重分形维数(D)和信息维数(D_1)、信息维数/容量维数(D_1/D_0)、关联维数(D_2)均与砂粉比呈负相关, 而滴灌形成的湿润体体积与砂粉比正相关, 且 D 较 D_0 、 D_1 、 D_1/D_0 、 D_2 更能解释土壤砂粉比差异对湿润锋运移的影响。滴灌下人工林水分运移满足函数定量关系, 砂粒占比高于70%且黏粒占比低于2.5%时, 土壤质地越粗则湿润体体积越大, 可在灌溉策略制定时进行土壤粒径分析, 节约决策成本。与库布齐沙地相似环境条件下, 滴灌时长6 h流量3.0 L/h时, 速生杨和榆树林在停灌后48 h需启动下次灌溉, 沙柳和旱柳林则不需要。

关键词: 库布齐沙地; 人工林; 滴灌; 土壤水分运移; 湿润锋; 分形维数

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Patterns of Soil Water Movement in Drip-Irrigated Plantations and Their Relationship with Soil Fractal Characteristics in Kubuqi Desert

SUN Kai¹, WANG Han¹, SUN Guirong², Alatengsuhe², YANG Jianjun², WANG Haichao¹, PEI Zhiyong^{1*}

(1 College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2 Erdos Afforestation General Plant, Inner Mongolia, Shulinzhao, Inner Mongolia 014300, China)

Abstract: Soil particle size distributions were measured in the typical plantations of in Kubuqi desert by laser particle size diffraction method, and the single fractal and multifractal dimensions were calculated. The dynamics of soil wetting front during irrigation and water redistribution periods were measured through field experiment, and the relationship between wetting front movement and fractal characteristics was explored by means of path and redundancy analysis. The results show: 1) During drip irrigation, the horizontal and vertical movement distances of the wetting fronts in Kubuqi desert can be described well by the logarithm functions ($R^2=0.941-0.990$) and the power functions ($R^2=0.958-0.996$). 2) When the volume fraction of sands is higher than 70% and the volume fraction of clays is lower than 2.5% in the soil, the multiple regression model based on the contents of silts and clays can better characterize the 2D water movement distance after irrigation is stopped ($R^2=0.839-1.000$), but it has poor applicability in the process of irrigation ($R^2=0.243-0.403$). 3) The single fractal dimension (D) and the multifractal dimensions such as entropy dimension (D_1), entropy dimension/capacity dimension (D_1/D_0), correlation dimension (D_2) are negatively correlated with the ratio of sands/silts of the soil, while the final volume of wetting body formed by drip irrigation is positively correlated with the ratio of sands/silts of the soil. And D is better than D_0 , D_1 , D_1/D_0 and D_2 to explain the effect of the difference of the ratio of soil sands/silts on the movement of wetting front. There are some functional quantitative relationships of

①基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0009)、内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0078)和内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY21500)资助。

* 通讯作者(peizhiyong@imau.edu.cn)

作者简介: 孙凯(1990—), 男, 内蒙古乌拉特前旗人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为灌木林资源开发与水土保持。E-mail: 839473172@qq.com

soil water movement in drip-irrigated plantations. When the proportion of sands is higher than 70% and that of the clays is lower than 2.5%, the lower the content of fine particles in the soil, the larger the volume of wetting body formed by drip irrigation. The soil particle size can be analyzed in the formulation of irrigation strategy to save the decision-making cost. Under the environmental conditions similar to Kubuqi desert, when the duration of drip irrigation is 6 h and the flow is 3.0 L/h, the next irrigation should be considered for the *Populus popular* and *Ulmus pumila* within 48 h after stopping irrigation, but not for *Salix psammophila* and *Salix matsudana* Koidz plantations.

Key words: Kubuqi sandy land; Plantations; Drip irrigation; Soil water movement; Wetting front; Fractal dimension

灌溉能提高根区土壤的水分有效性,从而在短时间内提高人工林生产力^[1]。然而不合理灌溉不仅会造成大量水资源浪费,还会导致地下水污染、土壤盐渍化等环境问题^[2]。因此,揭示人工林灌溉土壤水分运移规律及其影响因子,研究高效节水灌溉技术及精准灌溉策略,有利于因地制宜开展灌溉。

人工林常用节水灌溉技术有滴灌、喷灌、渗灌等,滴灌较其他灌溉方式能提高植物水分利用效率达 14% ~ 35%^[3],因而被广泛应用于人工林培育^[4]。关于人工林滴灌的研究较多,部分研究包括了滴灌下人工林蒸腾过程^[5]、根系分布及生长^[6],但对滴灌下人工林水分运移的研究较少。滴灌使水流缓缓滴到植物的根部和土壤中,通过水分运移过程形成土壤湿润体供植物吸收大量的水分和养分^[7],因而土壤水分运移规律也是湿润体特征参数(如水平和垂直湿润锋)的时空变化规律^[8-9],该规律对人工林生长和发育有重要影响。

土壤是具有不规则形状和自相似结构的多孔介质,存在一定的粒径分形特征^[10],而决定分形特征的土壤粒径分布(particle size distribution, PSD)对土壤水分运动^[11]、持水性能^[12]和溶质运移^[13]有重要意义,被广泛应用于估计土壤水分特征曲线^[13]及水力传导度^[14]等。土壤分形特征通过影响 PSD 对土壤水分运移的驱动力和水力传导度产生影响^[15]。此外,土壤粒径单重分形维数越大,则土壤质地越细^[16],此时固相比表面积越大,表面能越高、吸附能力越强,粒间孔隙越小,吸水、保水性能越强,阻滞了水分入渗能力及湿润锋运移^[17-18]。因此,探究不同人工林分形特征参数对滴灌水分运移规律的影响,对揭示不同土壤 PSD 下水分利用策略至关重要。已有学者应用单重及多重分形维数对土壤 PSD 与水分特征曲线及持水特性的关系进行了研究^[19],但关于土壤分形特征与滴灌下湿润锋运移规律的关联性研究还鲜有报道。

沙柳(*Salix psammophila*)、速生杨(*Populus popular*)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz)及榆树(*Ulmus*

pumila)因速生、耐旱等特点成为内蒙古中西部地区典型树种,本研究以该 4 类人工林为研究对象,在库布齐沙地研究区内,采用大田试验法观测土壤水分运移动态过程,通过激光粒度衍射法测定土壤 PSD 并计算单重和多重分形维数,旨在对比滴灌下不同人工林土壤水分运移过程及湿润体形态差异以确定合理灌溉策略;分析不同土壤 PSD 下分形维数对湿润体时空变化特征的影响,以期初步剖析滴灌下湿润体的形成机理。

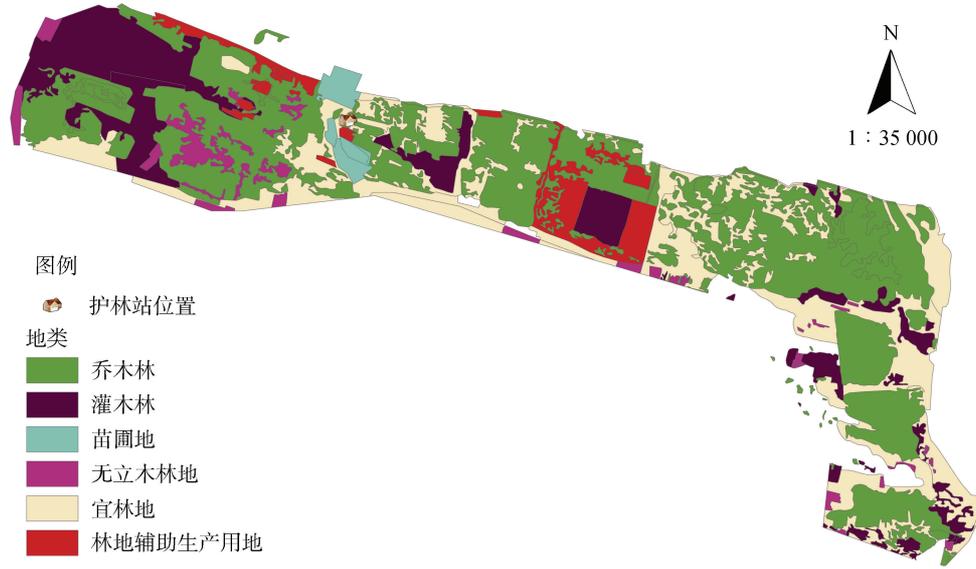
1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗鄂尔多斯造林总场沟心召分场曹四滩护林站(40°14'24"N, 110°39'14"E, 海拔 1 128 m),其人工林资源分布如图 1 所示。该地属温带大陆性季风气候,多年平均气温 6.1℃,平均降水量 297.3 mm。土壤以草甸风沙土为主,人工林主要树种为沙柳、速生杨、旱柳及榆树等,林下草本植被以沙生植物为主。试验地土壤颗粒组成及质地见表 1,其中土壤颗粒组成采用 RODOS/M 型激光粒度分析仪(德国)基于激光粒度衍射法得到。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计与样品采集 针对各类人工林分别随机选择 1 个试验小区(每类人工林含 3 个试验小区,即 3 个重复),试验小区大小为 40 m × 36 m,林木长势良好、均匀。试验地滴头布置于 2021 年 7 月,滴头流量 3.0 L/h,间距 100 cm,沿树行方向按一行二带式布置于地表,滴灌管铺设于树体两侧距树 30 cm 处。在各试验小区中各随机选择 6 个滴头,并在滴头正下方 20 cm 深处安装土壤水势传感器(TEROS21, METER, the US),与其配套的数据采集器(ZL6Basic, METER, the US)每隔 15 min 记录一次数据。生长季内,由于土壤水分有效性低于 70% 时,林木生长量开始下降^[20],则对于本研究样地土壤含水量至少应为田间持水量的 78.9%,因此设定当滴头



图例
 护林站位置
 地类
 乔木林
 灌木林
 苗圃地
 无立木林地
 宜林地
 林地辅助生产用地

图 1 曹四滩护林站人工林资源分布图

Fig. 1 Distribution of artificial forest resources in Caositan forest protection station

表 1 人工林试验地土壤颗粒组成及质地

Table 1 Soil particle compositions and textures in experimental plantations

人工林类型	林龄 (a)	土层 (cm)	颗粒组成(%, <i>V/V</i>)			质地	砂粉比
			砂粒	粉粒	黏粒		
沙柳	3	0~20	91.28 ± 0.46	8.42 ± 0.44	0.31 ± 0.02	砂土	10.84 ± 0.64
		20~40	88.22 ± 0.19	11.44 ± 0.18	0.34 ± 0.04	壤砂土	7.71 ± 0.14
		40~60	87.94 ± 0.11	11.61 ± 0.14	0.45 ± 0.03	壤砂土	7.57 ± 0.10
		60~80	85.54 ± 0.36	13.89 ± 0.36	0.57 ± 0.05	壤砂土	6.16 ± 0.18
速生杨	35	0~20	90.57 ± 0.18	9.34 ± 0.23	0.09 ± 0.05	砂土	9.70 ± 0.25
		20~40	95.19 ± 0.26	4.74 ± 0.28	0.07 ± 0.02	砂土	20.08 ± 1.28
		40~60	96.72 ± 0.44	3.24 ± 0.39	0.04 ± 0.02	砂土	29.82 ± 3.66
		60~80	94.09 ± 0.21	5.54 ± 0.21	0.37 ± 0.02	砂土	16.98 ± 0.66
旱柳	12	0~20	88.62 ± 0.66	11.17 ± 0.49	0.21 ± 0.18	壤砂土	7.94 ± 0.41
		20~40	82.85 ± 0.19	16.61 ± 0.20	0.54 ± 0.06	砂壤土	4.99 ± 0.07
		40~60	78.73 ± 0.20	19.86 ± 0.25	1.41 ± 0.09	砂壤土	3.96 ± 0.06
		60~80	80.66 ± 0.18	18.18 ± 0.14	1.16 ± 0.06	砂壤土	4.44 ± 0.04
榆树	35	0~20	71.77 ± 0.45	26.19 ± 0.37	2.04 ± 0.09	砂黏壤土	2.74 ± 0.06
		20~40	80.68 ± 0.11	18.20 ± 0.10	1.12 ± 0.03	砂壤土	4.43 ± 0.03
		40~60	80.78 ± 0.12	18.22 ± 0.13	1.00 ± 0.01	砂壤土	4.43 ± 0.04
		60~80	78.95 ± 0.50	19.05 ± 0.45	2.00 ± 0.06	砂壤土	4.15 ± 0.13

注：土壤质地采用美国农业部制；砂粉比为砂粒与粉粒体积分数之比。

正下方 20 cm 处的土壤水势达到 -20 kPa(即土壤含水量为田间持水量的 81%)时开始灌溉,灌溉时长 6 h。然后对各试验小区的地表土壤湿润锋运移距离进行测定,期间为减少水分蒸发采用低透光塑料布遮盖。

2021 年 8 月初采集土样,取土剖面设置在各试验小区相邻的林木林带之间,剖面与林带距离统一为 45 cm(距离滴头 15 cm),在每个试验小区中随机选择 3 个滴头(共 12 个滴头),也即 3 个剖面进行分层取土。考虑研究区地下水位及人工林细根分布情况,取土深

度为 80 cm,取样间隔为 20 cm,即按 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 分层取样,采用体积为 100 cm³ 环刀各剖面每层随机取 3 个土样进行混合,用于测定土壤 PSD,其前处理方法参考文献[21]。

由表 1 可知,各人工林土壤质地以砂土及砂壤土为主,且颗粒组成中黏粒占比均低于 2.50%,而砂粒占比超过 70.0%。为定量描述不同人工林土壤质地差异,以土壤中砂粒与粉粒体积分数之比(以下简称砂粉比)作为土壤质地特征参数,当砂粉比 ≤ 4.0 时,土

壤质地记为 RSS1.0; 当砂粉比为 4.0~6.0(含 6.0)时, 记为 RSS1.5; 当砂粉比为 6.0~8.0(含 8.0)时, 记为 RSS2.0; 当砂粉比为 8.0~10.0(含 10.0)时, 记为 RSS2.5; 当砂粉比>10.0 时, 记为 RSS3.0。故按照砂粉比均值将榆树、旱柳、沙柳和速生杨土壤分别标记为 RSS1.0、RSS1.5、RSS2.0 和 RSS3.0。

1.2.2 测定项目和方法 1)湿润锋水平运移距离(HMDW)。2021年8月,于各试验小区中各随机选择4个滴头(共16个滴头),采用卷尺测量滴灌过程中及停灌后的HMDW,停灌前HMDW每10或20min测定1次,停灌后每1h观测1次,停灌4h后每12h观测1次,直至停灌后41h。

2)湿润锋垂直运移距离(VMDW)。每个滴头附近由取土剖面改造为观测坑,观测坑长2.0m、宽1.5m、深1.2m,使观测坑长边距离滴头10cm,用卷尺测量滴灌过程中及停灌后土壤剖面上的VMDW,并对距地表每隔5cm划辅助线测量剖面HMDW(图2)。VMDW在灌溉过程中及停灌4h内每20min测定1次,停灌4h后每1h观测1次,剖面HMDW每1h观测1次,直至停灌后41h。

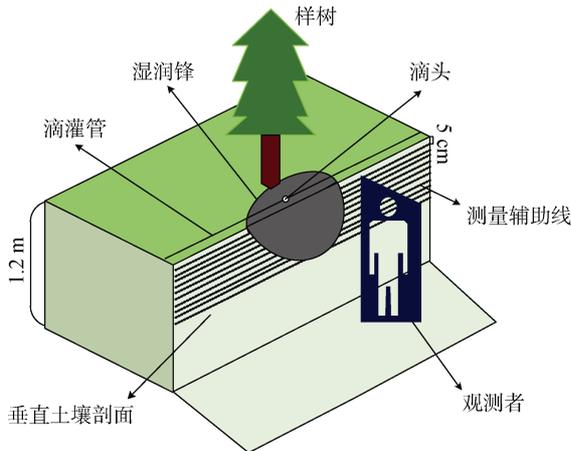


图 2 湿润锋测量示意图

Fig. 2 Diagram of wetting front measurement

3)土壤颗粒单重分形维数。在内蒙古农业大学土壤物理实验室利用粒径范围为0.02~2000μm激光粒度分析仪进行粒度分析,获取PSD数据。依据美国农业部标准,将土壤粒径分为7类,即极粗砂(1000~2000μm)、粗砂(500~1000μm)、中砂(250~500μm)、细砂(100~250μm)、极细砂(50~100μm)、粉粒(2~50μm)和黏粒(<2μm)。采用土壤颗粒体积分形模型来计算单重分形维数^[22],计算公式如下:

$$3-D = \frac{\lg[V_{(r<R_i)}/V_T]}{\lg[R_i/R_{\max}]} \quad (1)$$

式中: R_i 为某粒径区间上下限算术平均值(μm); R_{\max} 为粒径分级中最大粒径(μm); $V_{(r<R_i)}$ 为粒径小于 R_i 的颗粒累计体积(cm^3); V_T 为颗粒总体积(cm^3); D 为单重分形维数^[21]。

4)土壤颗粒多重分形维数。取激光粒度分析仪测量区间 $I=[0.02, 2000]$,按照对数等差数列划分为100个子区间 $I_i=[\varphi_i, \varphi_{i+1}]$, φ_i 和 φ_{i+1} 为仪器测得粒径范围, $i=1,2,3,\dots,100$,各子区间 I_i 内的粒径体积分数用 V_i 表示,即 V_1, V_2, \dots, V_{100} 。则

$$\sum_{i=1}^{100} V_i = 100 \quad (2)$$

由于 $\lg(\varphi_{i+1}/\varphi_i)$ 为常数,为使区间 I_i 的各子区间长度相同,构造无量纲区间 $J=[\lg(0.02/0.02), \lg(2000/0.02)]=[0, 5]$,可将 J 划分为 $N(\varepsilon)=2^k$ 个尺寸相同的小区间, $\varepsilon=5 \times 2^{-k}$,每个小区间内至少包含一个仪器测量值,故正整数 k 可取1~6。以 $p_i(\varepsilon)$ 为每个小区间PSD体积分数,多重分形广义维数谱为:

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg \left[\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon)^q \right]}{\lg \varepsilon} \quad (q \neq 1) \quad (3)$$

$$D_q = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} [p_i(\varepsilon) \lg p_i(\varepsilon)]}{\lg \varepsilon} \quad (q = 1) \quad (4)$$

利用公式(3)和(4)可以得到广义维数谱 D_q ,本文中只讨论当 $q=0, 1, 2$ 时,对应的 D_0, D_1 和 D_2 ,分别是容量维数、信息维数和关联维数^[11,19]。

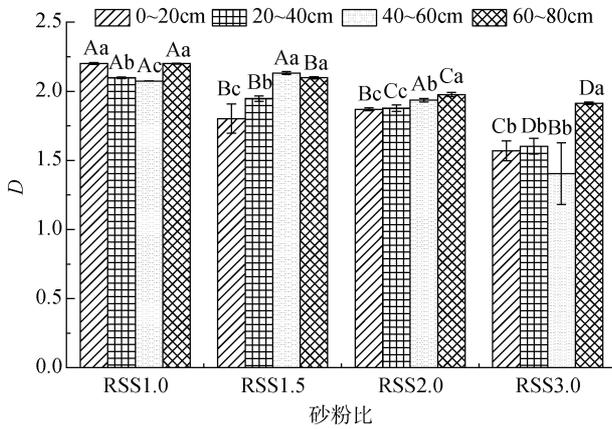
1.2.3 数据分析 采用Excel 2016、Origin 2019、SPSS 25.0和Canoco 5软件进行数据处理和图表绘制。

2 结果分析

2.1 人工林不同砂粉比土壤颗粒分形特征

各人工林不同砂粉比土壤颗粒单重分形维数(D)对比如图3所示。 D 在不同砂粉比土壤下或相同土壤不同土层间均存在一定差异($P<0.05$),且随土壤砂粉比增大呈现下降趋势。从人工林树种类型来看,除个别土层外,同一土层RSS1.0单重分形维数最高,RSS1.5和RSS2.0次之,RSS3.0单重分形维数最小。

表2表明,除容量维数(D_0)外,各多重分形维数特征值在不同人工林土壤下均存在显著性差异($P<0.05$)。信息维数(D_1)、 D_1/D_0 、关联维数(D_2)在不同人工林下各土层均随土壤砂粉比增大呈现明显下降趋势,对于各人工林均表现为RSS1.0>RSS1.5>RSS2.0>RSS3.0,即RSS1.0的PSD异质性最大,最



(柱图上方不同大写字母表示相同土层不同砂粉比土壤间差异显著 ($P < 0.05$), 而不同小写字母表示相同砂粉比土壤不同土层间差异显著 ($P < 0.05$), 样本数 $n=3$)

图 3 不同砂粉比土壤单重分形维数

Fig. 3 Single fractal dimensions of soils with different ratios of sands/silts

集中于密集区, 均匀性最高, RSS1.5 和 RSS2.0 次之, RSS3.0 最小。

2.2 不同人工林土壤水分运移动态特征

2.2.1 土壤湿润锋的一维运移 如图 4A 所示, 湿润锋在不同人工林地具有相似的水平运移过程。灌溉开始后, 各人工林地表 HMDW 迅速增加, 但灌溉 2 h 后其增速趋于平缓, 到灌溉结束时约为 12.7 ~ 25.5 cm, 彼此间差异显著 ($P < 0.05$)。不同人工林 HMDW 随灌水时长的变化规律均可用对数函数式

$y=m+n\ln(t-l)$ 描述, 式中 y 为 HMDW 值 (cm), t 为灌溉时长 (h), m 、 n 、 l 为方程待定参数 (表 3), 其 $R^2=0.941 \sim 0.990 (P < 0.05)$ 。灌溉结束后一定时间内, 各地表湿润半径并未减小, 而是呈小幅增大趋势, 但均在停灌后 17 h 达到峰值, 峰值范围为 14.9 ~ 25.6 cm, 此时 HMDW 受人工林土壤差异的显著影响 ($P < 0.05$)。RSS1.0 在停灌后 2 h 时 HMDW 即达到峰值 25.6 cm, 而 RSS1.5、RSS2.0 和 RSS3.0 均在停灌后 17 h 达到峰值 14.9 ~ 20.0 cm, 随后均减小, 停灌 41 h 后减小至 7.6 ~ 19.5 cm。

灌溉过程中, 各类人工林 VMDW 不断增加, 但增速逐渐变缓, VMDW 与滴灌时长之间的定量关系均可拟合为幂函数 $y=pt^q$ 描述, 式中 y 为 VMDW (cm), t 为灌溉时长 (h), p 、 q 为方程参数 (表 3), 其 $R^2=0.958 \sim 0.996 (P < 0.01)$ 。灌溉初始 4 h 内, VMDW 在不同人工林未出现明显区分, 直到灌溉停止时, 各人工林的 VMDW 可达约 48.1 ~ 58.0 cm, 但未见显著差异 ($P > 0.05$)。停灌 2 h 后 VMDW 开始呈现显著差异 ($P < 0.05$), 至停灌 17 h 时, 土壤湿润深度较停灌时增加约 10.5 ~ 20.0 cm, 达到 58.6 ~ 75.0 cm, 不同人工林间差异显著 ($P < 0.05$), 此时运移速率极慢, 可近似看作达到 VMDW 峰值 (图 4B)。

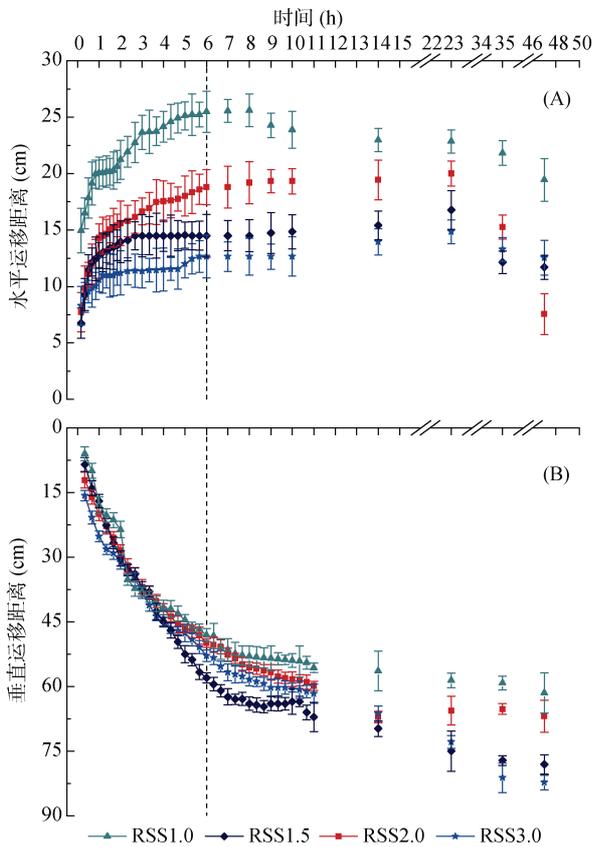
2.2.2 土壤湿润锋的二维运移 依据土壤剖面测得的湿润锋运移过程, 选取灌溉过程中 VMDW 分别接近 20、40、60 cm 土壤深度的时间 1、3、6 h, 以

表 2 不同砂粉比土壤多重分形维数特征值

Table 2 Multifractal dimensions of soils with different ratios of sands/silts

砂粉比	土层 (cm)	D_0	D_1	D_1/D_0	D_2
RSS1.0	0 ~ 20	0.962 ± 0.003 a	0.724 ± 0.001 a	0.753 ± 0.002 a	0.644 ± 0.002 a
	20 ~ 40	0.964 ± 0.000 a	0.676 ± 0.003 a	0.702 ± 0.003 a	0.595 ± 0.003 a
	40 ~ 60	0.964 ± 0.000 a	0.680 ± 0.001 a	0.706 ± 0.001 a	0.606 ± 0.001 a
	60 ~ 80	0.959 ± 0.000 b	0.686 ± 0.002 a	0.715 ± 0.002 a	0.594 ± 0.005 a
RSS1.5	0 ~ 20	0.964 ± 0.000 a	0.625 ± 0.010 b	0.648 ± 0.010 b	0.572 ± 0.006 b
	20 ~ 40	0.961 ± 0.003 b	0.648 ± 0.003 b	0.675 ± 0.004 b	0.592 ± 0.004 a
	40 ~ 60	0.959 ± 0.000 b	0.682 ± 0.001 a	0.711 ± 0.001 a	0.602 ± 0.003 b
	60 ~ 80	0.959 ± 0.000 b	0.664 ± 0.001 b	0.693 ± 0.001 b	0.581 ± 0.001 b
RSS2.0	0 ~ 20	0.964 ± 0.000 a	0.608 ± 0.002 c	0.631 ± 0.002 c	0.547 ± 0.001 d
	20 ~ 40	0.964 ± 0.000 a	0.628 ± 0.000 c	0.652 ± 0.000 c	0.569 ± 0.001 b
	40 ~ 60	0.964 ± 0.000 a	0.634 ± 0.001 b	0.658 ± 0.001 b	0.569 ± 0.002 c
	60 ~ 80	0.964 ± 0.000 a	0.648 ± 0.001 c	0.672 ± 0.001 c	0.579 ± 0.001 b
RSS3.0	0 ~ 20	0.954 ± 0.010 a	0.605 ± 0.006 c	0.635 ± 0.003 c	0.555 ± 0.002 c
	20 ~ 40	0.959 ± 0.000 b	0.553 ± 0.002 d	0.577 ± 0.002 d	0.499 ± 0.002 c
	40 ~ 60	0.964 ± 0.000 a	0.547 ± 0.006 c	0.568 ± 0.006 c	0.497 ± 0.003 d
	60 ~ 80	0.964 ± 0.000 a	0.570 ± 0.001 d	0.592 ± 0.001 d	0.503 ± 0.002 c

注: D_0 为容量维数; D_1 为信息维数; D_2 为关联维数; 同列不同小写字母表示相同土层不同砂粉比土壤间差异显著 ($P < 0.05$)。



(图中虚线为停灌时刻; 下同)

图 4 湿润锋运移距离随滴灌时间的变化

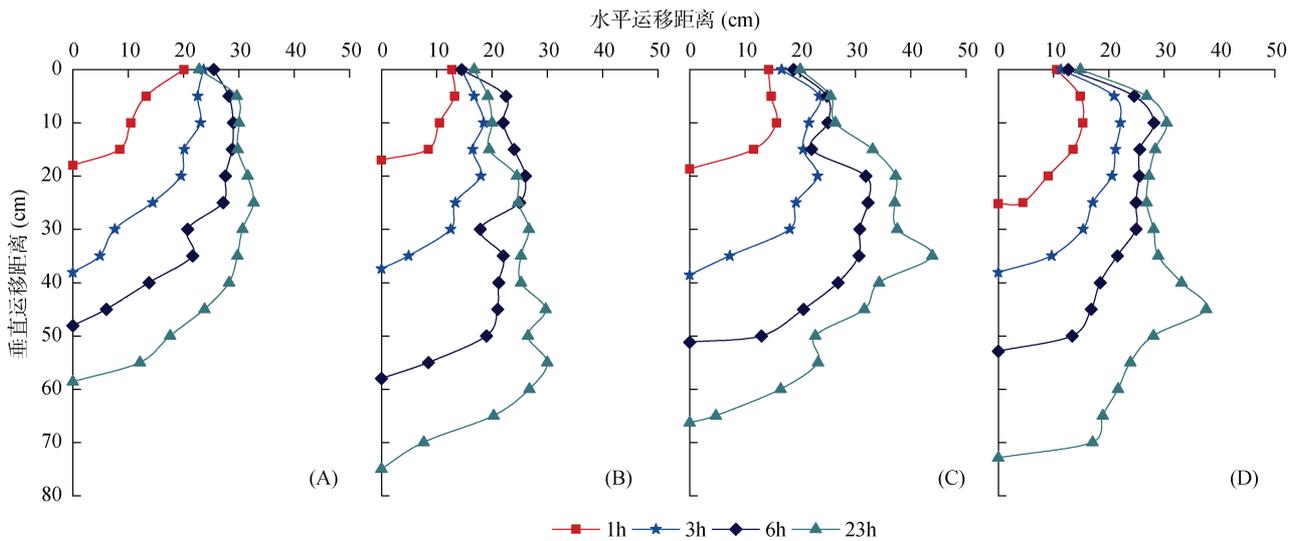
Fig. 4 Variation of wetting front movement distance with drip irrigation time

表 3 湿润锋运移距离与滴灌时间拟合方程参数
Table 3 Parameters of fitting equation between wetting front movement distance and drip irrigation time

运移类型	参数	RSS1.0	RSS1.5	RSS2.0	RSS3.0
水平运移	m	18.811	12.796	13.695	10.498
	n	3.685	1.288	2.807	0.98
	l	-0.219	0.158	0.0538	0.0665
	R^2	0.976*	0.958*	0.990*	0.941*
垂直运移	p	15.348	18.084	20.354	24.439
	q	0.712	0.659	0.512	0.419
	R^2	0.958**	0.996**	0.996**	0.992**

注: m 、 n 、 l 为湿润锋水平运移方程 $y=m+n\ln(t-l)$ 参数; p 、 q 为湿润锋垂直运移方程 $y=pt^q$ 参数; R^2 为决定系数。*表示在 $P<0.05$ 水平显著, **表示在 $P<0.01$ 水平显著; 下同。

及灌溉开始后 23 h(即停灌后 17 h)各人工林 HMDW 达到峰值且 VMDW 增大极其缓慢时, 以这些时间作为滴灌形成湿润体的特征时刻研究湿润锋的二维运移。图 5 表明各人工林 HMDW 存在时空变异性, 灌溉 6 h 即停灌时刻榆树、旱柳、沙柳和速生杨 HMDW 最大值分别出现在 0~20、20~40、20~40 和 0~20 cm 土层, 值分别为 29.0、26.0、32.3 和 28.2 cm。对于最终形成的湿润体, HMDW 最大值分别出现在 20~40、40~60、20~40 和 40~60 cm 土层, 分别为 32.7、30.0、43.9 和 37.6 cm, 都小于该人工林的最终垂直运移距离。



(A: RSS1.0, B: RSS1.5, C: RSS2.0, D: RSS3.0; 图 6、图 7、图 8 同)

图 5 不同人工林特征时刻湿润锋二维运移曲线

Fig. 5 2D movement curves of wetting fronts at main moment of different plantations

灌溉形成的土壤湿润体形态如图 6 所示。RSS1.0 土壤湿润体为长半椭球体; RSS1.5 为上部多个圆台体叠放和下部圆锥体的组合体, 在中下部出现小突出; RSS2.0 湿润体为上部多个圆台体叠放和下部圆

锥体的组合体, 且在中部位置出现尖锐突出; RSS3.0 为上部双曲线旋转体和下部圆台体的组合体, 同样在中部位置出现尖锐突出。湿润体体积 RSS3.0 最大, RSS2.0 次之, RSS1.5 和 RSS1.0 最小。

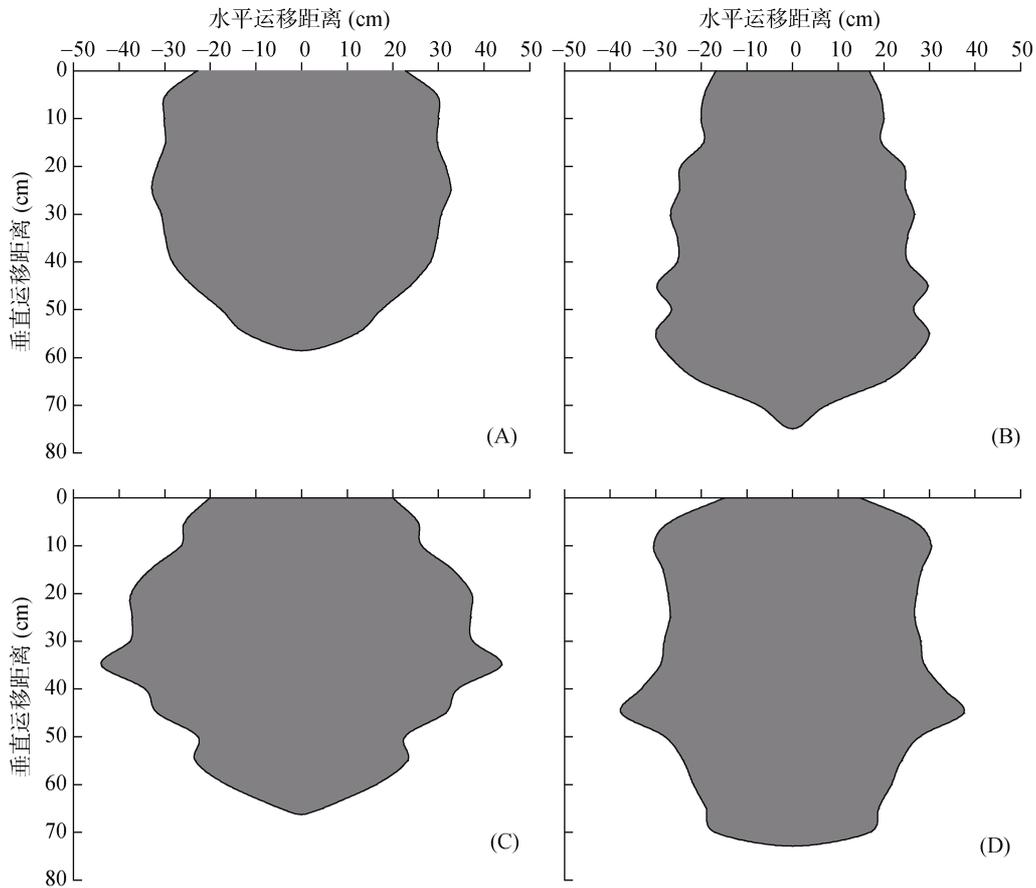


图 6 灌溉最终形成的土壤湿润体形态
 Fig. 6 Final form of soil wetting body formed by irrigation

2.2.3 土壤湿润锋运移速率 由图 7 可知,灌溉时间(0~6 h)和停灌后水分再分布时间(6~47 h)内,各人工林湿润锋水平运移速率均值在不同土层间均呈现减小趋势。灌溉时间内,0~20、20~40 和 40~60 cm 土层平均水平运移速率随土层深度增加均出现增大趋势,40~60 cm 土层较 0~20 cm 土层增大 0.011~0.080 cm/min。停灌后,水平运移速率随土层加深变化趋势与停灌前相似,但增幅减小,60~80 cm 土层较 0~20 cm 土层增大 0.006~0.047 cm/min。

各人工林湿润锋垂直运移速率均值随时间变化及土层加深整体均呈现减小趋势(图 8)。灌溉 0~6 h 内,40~60 cm 土层较 0~20 cm 土层垂直运移速率均值下降 0.16~0.44 cm/min。停灌后,垂直运移速率均值随土层加深变化趋势与停灌前相似,但降幅减小,60~80 cm 土层较 40~60 cm 土层减小 0.017~0.053 cm/min。

2.3 不同人工林水分运移与土壤分形特征的关系

2.3.1 一维运移方程参数与土壤分形特征的关系

系 各人工林湿润锋一维运移方程参数与土壤分形维数的相关系数及直接通径系数见表 4。单重分形维数(D)、信息维数(D_1)、信息维数/容量维数(D_1/D_0)、关联维数(D_2)与方程各参数均显著相关,与 m 、 n 和 q 呈正相关($P < 0.05$),与 l 和 p 呈负相关($P < 0.01$),其中 D 与各参数相关性最大,均呈极显著相关($P < 0.01$); D_0 与方程参数相关性不显著($P > 0.05$)。通径分析表明,影响湿润锋水平运移方程参数 m 、 n 和 l 的分别为 D 和 D_1/D_0 、 D_1/D_0 和 D_2 、 D_1/D_0 和 D_2 ; 影响垂直运移方程参数 p 和 q 的分形维数均为 D 和 D_2 。

从图 9A 可知,土壤分形特征共解释了 96.17% 水分一维水平运移方程参数的变异,其中第一轴和第二轴解释率分别为 94.61% 和 1.56%。 D 、 D_1/D_0 和 D_2 对方程参数解释率较大,分别为 91.8%、2.6% 和 1.8%; 图 9B 表明水分一维垂直运移方程参数 81.3% 的变异可由土壤分形特征来解释,两个典型变量对方程参数变异的解释率分别为 81.25% 和 0.05%, D 和 D_2 对方程参数解释率较大,分别为 78.1% 和 2.7%。

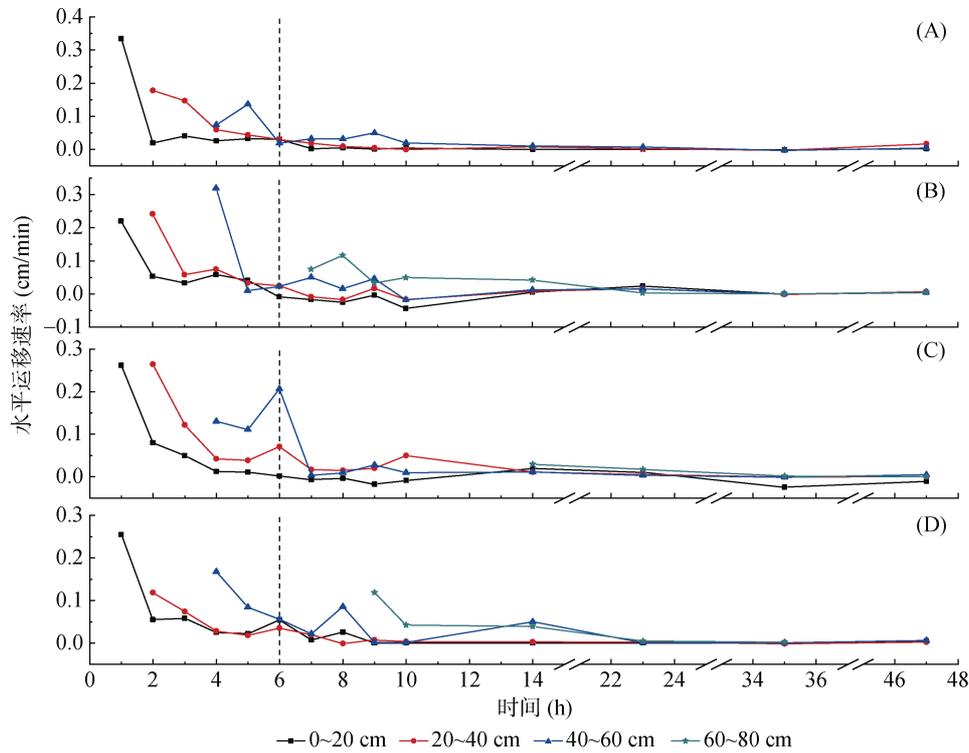


图 7 不同人工林各土层湿润锋水平运移速率均值

Fig. 7 Mean horizontal movement rates of wetting fronts in different soil layers of different plantations

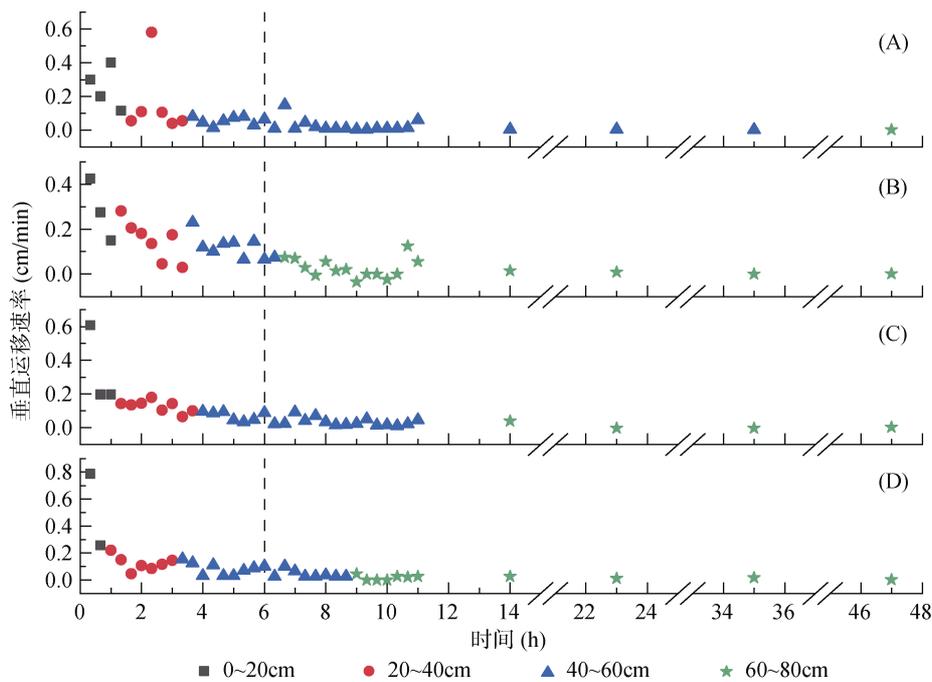


图 8 不同人工林各土层湿润锋垂直运移速率均值

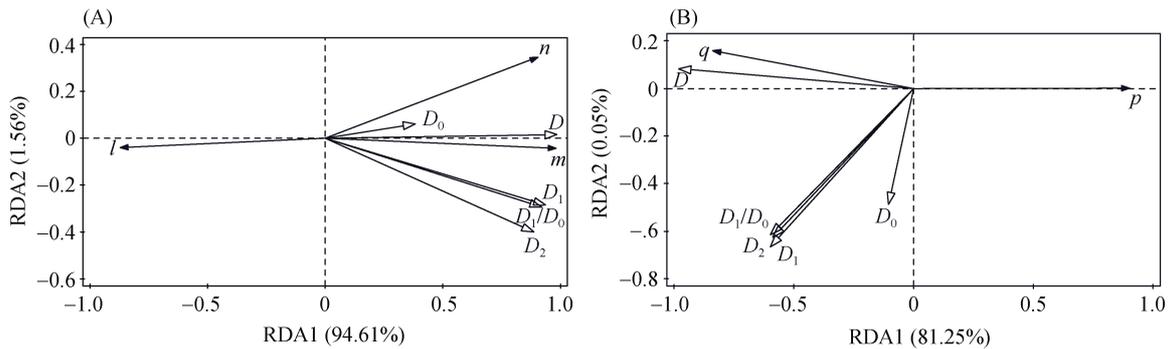
Fig. 8 Mean vertical movement rates of wetting fronts in different soil layers of different plantations

2.3.2 二维运移特征与土壤颗粒分布的关系 从停灌前后湿润锋二维运移距离与土壤颗粒组成多元回归模型来看(表 5), 粉粒和黏粒含量与湿润锋运移距离关系最为密切。停灌前, 湿润锋能够到达的 0~60 cm 各

土层 HMDW 多元回归模型的决定系数 R^2 仅为 0.265 ~ 0.403, 且随土层加深而减小; 而停灌后, 湿润锋能够到达的 0~80 cm 各土层 HMDW 模型的 R^2 高达 0.911 ~ 1.000。停灌前后 VMDW 模型 R^2 分别为 0.243 和 0.839。

表 4 运移方程参数与分形特征的相关系数及途径系数
Table 4 Correlation coefficients and path coefficients between movement equation parameters and fractal characteristics

项目	参数	D	D_0	D_1	D_1/D_0	D_2
相关系数	m	0.966**	0.367	0.931**	0.916**	0.887**
	n	0.896**	0.366	0.747**	0.73**	0.662*
	l	-0.785**	-0.041	-0.9**	-0.91**	-0.865**
	p	-0.884**	-0.083	-0.54**	-0.532**	-0.539**
	q	0.835**	-0.002	0.397*	0.395*	0.403*
直接途径系数	m	0.703	-0.037	-	0.688	-0.373
	n	0.623	0.047	-	3.637	-3.473
	l	0.778	-0.252	-	-5.869	4.357
	p	-0.824	0.069	0.063	-	-0.231
	q	0.869	-0.164	-0.233	-	0.238



(A: 水平运移; B: 垂直运移)

图 9 分形特征与一维运移方程参数冗余分析(RDA)

Fig. 9 Redundancy analysis (RDA) of fractal characteristics and parameters of 1D movement equation

表 5 二维运移距离与土壤颗粒组成多元回归模型

Table 5 Multiple regression models between 2D movement distance and soil particle composition

运移类型	时间	土层(cm)	回归模型	R^2
水平运移	停灌前	0 ~ 20	HMDW=-1.262 粉粒+9.312 黏粒+26.645	0.403
		20 ~ 40	HMDW=-85.713 粉粒+598.159 黏粒+71.715	0.301
		40 ~ 60	HMDW=-4.013 粉粒+21.722 黏粒+25.45	0.265
	停灌后	0 ~ 20	HMDW=-20.377 粉粒+123.681 黏粒+21.169	0.999
		20 ~ 40	HMDW=-124.8 粉粒+869.879 黏粒+69.661	0.932
		40 ~ 60	HMDW=1.218 粉粒-11.785 黏粒+14.593	0.911
垂直运移	停灌前	60 ~ 80	HMDW=-7.354 粉粒+58.333 黏粒+17.739	1.000
			VMDW=-3.758 粉粒+21.386 黏粒+56.643	0.243
	停灌后		VMDW=-4.359 粉粒+23.193 黏粒+22.49	0.839

3 讨论

3.1 不同人工林土壤水分运移规律

本研究针对库布齐沙地砂粒占比高于 70%、黏粒占比低于 2.5% 人工林土壤，采用流量恒定为 3.0 L/h 的滴头进行田间滴灌试验，停灌时地表 HMDW 范围为 12.7 ~ 25.5 cm，与灌水时长呈对数函数关系($R^2=0.941 \sim 0.990$)，相关性显著($P<0.05$)；

VMDW 范围为 48.1 ~ 58.0 cm，与灌水时长呈幂函数关系($R^2=0.958 \sim 0.996$)，相关性极显著($P<0.01$)，回归方程类型与已有成果^[9,23-24]中一致，且决定系数更大，表明在本研究条件下该方程适用性更强。

滴灌形成的土壤湿润体形态是表征灌溉效果的重要指标，在研究和生产方面具有重要的参考意义^[7]。对比各人工林在滴灌下所产生的土壤湿润体形态(图 6)与树木根系分布范围及形态特征的关系，从灌溉开始

至停灌后 41 h 内, 旱柳林土壤湿润体形态范围为水平向 30 cm 和垂向 80 cm 内, 可以基本满足其细根水平向和垂向主要利用水分范围(0~60 cm)^[25]; 沙柳林土壤湿润体形态范围为水平向 45 cm 和垂向 65 cm 内, 与其细根主要利用水分范围(水平和垂直方向均 0~40 cm)一致^[26], 可满足主要根区水分需求; 速生杨林土壤湿润体形态范围为水平向 40 cm 和垂向 75 cm 内, 较难满足其细根垂向主要利用水分范围(0~100 cm); 榆树林土壤湿润体形态变化范围为水平向 35 cm 和垂向 60 cm 内, 较难满足其细根水平向和垂向主要利用水分范围(0~90 cm)^[27]。说明在库布齐沙地土壤采用流量为 3.0 L/h 的滴头进行 6 h 地表滴灌时, 对于速生杨和榆树在停灌后 48 h 可能需要启动下次灌溉, 而对于沙柳及早柳则不需要。

讨论湿润体的形成过程对明确土壤水分再分布特性有重要意义。图 6 表明, 除榆树外各人工林滴灌形成的湿润体在不同土层均出现“突出”形状, 这与文献[7]和[28]中所阐述的“长半球球体”或“圆台体和半球体的组合体”有一定差异。依据图 5, 湿润体形状随灌溉特征时刻变化而发生显著变化, 而上述“突出”形状均出现在停止灌溉后的 17 h 内, 且不同人工林的“突出”发生的土层不同, 这可能与不同植物根系对土壤水分再分布的影响有关^[29]。本研究中三年生沙柳作为灌木林细根主要分布于 0~40 cm 浅层土壤^[26], 故在形成湿润体过程中该土层容易产生水平向优先流, 湿润体在水平向形状偏“粗壮”, 停灌后易在 20~40 cm 出现湿润锋“突出”; 而速生杨和旱柳根系较深且相比于沙柳更侧重于垂直方向生长, 所以湿润体形状偏“细长”, 此外由于停灌前存在垂向优先流, 停灌后土壤中水分集中于深层土壤(40~80 cm), 因此容易在 40~60 cm 土层产生水平向优先流而出现湿润体“突出”; 而由于榆树林各土层土壤颗粒组成中粉粒含量明显高于其他人工林, 砂粒含量少而质地偏细(表 1), 可能由于土壤细颗粒含量达到一定值时根系附近较难形成水平向优先流, 故湿润体形状规则且未形成“突出”。

不同土层湿润锋运移速率的变化对湿润体的形成有较大影响。各人工林湿润锋水平和垂直运移速率均值在不同土层间均随时间变化呈下降趋势(图 7~图 8), 这是由于在入渗初期, 湿润距离较小, 湿润锋处土壤含水率较高, 湿润锋周边水势梯度较大, 水吸力大, 湿润锋运移速率较大; 随时间推移, 湿润距离逐渐增大, 湿润锋处的土壤含水率却逐渐减小, 其周边水势梯度相应减小, 水吸力小, 故湿润锋运移速

率减小, 这与文献[30]和[31]研究结果一致。随土层深度增加, 湿润锋垂直运移速率逐渐减小但水平运移速率小幅增大, 垂直运移速率减小仍与时间变化水势梯度减小有关; 从湿润锋二维运移过程(图 5)来看, 各土层水平运移情况受不同时刻垂直运移距离影响较大, 浅土层由于在灌溉初期便出现湿润锋水平运移且随时间推移速率而不断减小, 土层越深则出现水平运移越晚, 则水势梯度和运移速率降幅也越小, 因此土层越深则水平运移速率均值越大。

3.2 土壤粒径分布特征对水分运移规律的影响

为进一步明确不同人工林土壤水分运移差异原因, 本文探讨了土壤 PSD 特征对停灌前湿润锋运移距离的影响。图 4 表明, 不同砂粉比人工林土壤湿润锋运移情况有明显差别, 尤其停灌前 RSS1.0(榆树)、RSS1.5(旱柳)和 RSS2.0(沙柳)HMDW 分别较 RSS3.0(速生杨)提高 100.8%、48.0% 和 14.2%; 而 RSS1.5、RSS3.0 和 RSS2.0 的 VMDW 分别较 RSS1.0 提高 20.6%、10.0% 和 3.7%。上述规律与文献[15]和[17]中“砂土地湿润锋的水平运移距离小于壤土和黏土, 而垂直运移距离则大于其他质地土壤”的结论相近, 只是本研究中 RSS3.0 和 RSS2.0 的 VMDW 并非高于 RSS1.5, 分析原因可能是文献[15]和[17]研究质地迥异土壤对一维水分运移的影响, 与本研究仅针对质地相近砂粉比有差异的土壤有所区别。本研究中 0~20 cm 土层各人工林土壤砂粉比接近(表 1), 范围为 7.94~10.84, 差异性明显低于 20~60 cm 土层, 而停灌时 RSS3.0 和 RSS2.0 湿润锋在 20~60 cm 深度范围内多个土层的 HMDW 均大于 RSS1.5(图 5), 故 VMDW 较小。此外, 表 4 的相关性和通径分析结果也表明, 灌溉过程中影响湿润锋一维水平运移规律的主要分形维数为 D_1/D_0 、 D_2 和 D , 其中 D 和 D_1/D_0 对方程参数解释率最好; 影响垂直运移规律的为 D 和 D_2 , 二者对方程参数解释率最好。表明土壤质地粗细和粒径集中程度主要影响湿润锋水平运移规律, 而质地粗细和粒径均匀性主要影响垂直运移规律。根据文献[19]和[32]的研究, 土壤颗粒分形特征与土壤持水特性存在显著相关。因此, 土壤 PSD 的变异性会影响土壤颗粒分布的均匀性, 而引起土壤中通气孔隙和持水性能的变化, 进而改变土壤水分运移规律, 故上述分形维数可以解释湿润锋运移方程参数的变异。此外, 冗余分析表明(图 9), D 对湿润锋水平和垂直运移的解释率分别为 91.8% 和 78.1%, 远高于 D_0 、 D_1 、 D_1/D_0 和 D_2 。

为剖析土壤 PSD 特征与滴灌形成湿润体的关联

性, 本文讨论了土壤 PSD 特征对停灌后湿润锋二维运移及湿润体形成的影响。根据图 4~ 图 6, 灌溉结束后 17 h 各人工林均形成湿润体最终状态, 不同砂粉比土壤的最大 HMDW 出现的土层不同, 且值为 30.0 ~ 43.9 cm, 均小于该土壤的最终 VMDW(58.6 ~ 75.0 cm)。对于停灌后不同人工林各土层 HMDW 均值, RSS3.0、RSS2.0 和 RSS1.5 分别较 RSS1.0 高 69.2%、58.5% 和 17.1%; 对于停灌后 VMDW, RSS3.0、RSS2.0 和 RSS1.5 分别较 RSS1.0 高 90.5%、49.5% 和 61.9%。以上结果表明, 土壤 PSD 对停灌后水分运移的影响较停灌前更大, 这与多元回归模型的决定系数结果一致(表 5), 即停灌后的 HMDW 和 VMDW 与土壤粉粒和黏粒含量回归模型的拟合效果较停灌前更好; 上述结果导致最终形成的湿润体体积中 RSS3.0 最大, RSS2.0 和 RSS1.5 次之, RSS1.0 最小, 这符合重质土壤的水分入渗能力低于轻质土壤的结论^[18,33]。

4 结论

1) 库布齐沙地砂粒占比高于 70%、黏粒占比低于 2.5% 条件下, 滴灌流量为 3.0 L/h、时长为 6 h 时, 滴灌过程中人工林土壤湿润锋水平及垂向动态变化规律可分别用对数函数($R^2=0.941 \sim 0.990$, $P<0.05$)和幂函数($R^2=0.958 \sim 0.996$, $P<0.01$)描述。为保证人工林需水, 上述条件下该地区速生杨和榆树林在停灌后 48 h 需考虑启动下次灌溉, 沙柳和旱柳林则不需要。

2) 本研究试验条件下, 单重分形维数对湿润锋水平和垂直运移规律的解释率分别为 91.8% 和 78.1%, 较多重分形维数更能表征土壤砂粉比差异对湿润锋运移的影响。由粉粒和黏粒含量构成的多元线性回归模型能够较好地计算停灌后水分运移距离($R^2=0.839 \sim 1.000$), 但对停灌前适用性不好($R^2=0.243 \sim 0.403$)。此外, 滴灌最终形成的湿润体体积随土壤砂粉比增大而增大, 可以预测其与植物根系分布有一定关系, 该假设将在今后的研究中予以验证。

参考文献:

[1] Kim H S, Oren R, Hinckley T M. Actual and potential transpiration and carbon assimilation in an irrigated poplar plantation[J]. *Tree Physiology*, 2008, 28(4): 559-577.

[2] 缪子梅, 代健健. 再生水灌溉调控对氮素渗漏流失影响及增产效应[J]. *水资源开发与管理*, 2021, 19(5): 31-35.

[3] Bhunia S R, Verma I M, Sahu M P, et al. Effect of drip irrigation and bioregulators on yield, economics and

water use of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) [J]. *Journal of Spices and Aromatic Crops*. 2015, 24(2) : 102-105

[4] 赵文芹, 席本野, 刘金强, 等. 不同灌溉条件下杨树人工林蒸腾过程及环境响应[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(4): 370-382.

[5] 赵飞飞, 马煦, 邸楠, 等. 毛白杨茎干不同方位夜间液流变化规律及其主要影响因子[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(8): 864-874.

[6] 刘晓丽. 黄土丘陵区枣林深层细根分布与土壤水分特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.

[7] 傅建平, 兰再平, 孙尚伟, 等. 滴灌条件下杨树人工林土壤的水分运移[J]. *林业科学*, 2013, 49(6): 25-29.

[8] McClymont L, Goodwin I. Effects of wetted soil volume on young pear trees[J]. *Acta Horticulturae*, 2016(1130): 479-484.

[9] 李豆豆, 席本野, 唐连峰, 等. 砂壤土下滴灌毛白杨幼林土壤水分运移规律与模拟[J]. *林业科学*, 2018, 54(12): 157-168.

[10] 李松阳, 林静远, 潘佳虹, 等. 泥石流频发区不同土地利用类型土壤粒径分布多重分形特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(4): 893-900.

[11] 王燕, 蒙仲举, 斯庆毕力格, 等. 基于多重分形的半干旱区农田表层土壤粒径分布特征研究[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 826-831.

[12] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182(3/4): 305-315.

[13] Hu H C, Tian F Q, Hu H P. Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(6): 1568-1574.

[14] Nichols P W B, Lucke T. A detailed analysis of sediment particle sizes and clogging in permeable pavements[J]. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 2017, 45(4): 1700078.

[15] Naglič B, Kechavarzi C, Coulon F, et al. Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size[J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(6): 421-436.

[16] 高雅宁, 廖李容, 王杰, 等. 禁牧对黄土高原半干旱草地土壤粒径多重分形特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 310-318, 326.

[17] Siyal A A, Skaggs T H. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(6): 893-904.

[18] 雷廷武, 毛丽丽, 张婧. 土壤入渗测量方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

[19] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砭砂岩区不同侵蚀程度表土多重分形特征与持水特性关系[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 620-627.

[20] Xi B Y, Bloomberg M, Watt M S, et al. Modeling

- growth response to soil water availability simulated by HYDRUS for a mature triploid *Populus tomentosa* plantation located on the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 176: 243–254.
- [21] 郑晓岚, 杨玲, 宋娇, 等. 水库消落带土壤颗粒组成分形及其空间分异特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 66–71.
- [22] 宛倩, 王杰, 王向涛, 等. 青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1716–1726.
- [23] 李明思, 康绍忠, 孙海燕. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(4): 32–35.
- [24] 王治军, 雒天峰. 滴灌条件下侧柏林地根区土壤水分运动规律研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4): 13–16.
- [25] 蔡海珍. 黑河源流区旱柳根系分布特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(33): 16299–16301.
- [26] 冯莉莉, 贾志清, 刘涛, 等. 高寒沙区几种典型固沙植物细根生物量及周转速率比较[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 120–125, 130.
- [27] 王凯, 宋立宁, 吕林有, 等. 科尔沁沙地主要造林树种细根适应策略[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(12): 128–131.
- [28] 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.
- [29] 金世杰, 费良军, 傅渝亮. 土壤水分再分布特性研究进展[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(3): 251–259, 264.
- [30] 张国祥, 申丽霞, 郭云梅. 压力水头与土壤容重对微润灌溉水分入渗的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(4): 67–73.
- [31] 吕文聪, 邱阳, 谢忠奎, 等. 砾石覆盖粒径对土壤入渗过程的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 46–51.
- [32] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林区开垦地人为加速侵蚀与土壤物理力学性质的时间变化[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 20–23.
- [33] 解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. *太原理工大学学报*, 2004, 35(5): 537–540.