2019年11月 Nov. 2019

文章编号:1672-3317(2019)11-0049-09

含砂层层位及厚度变化条件下层状土上升 毛管水运动特性研究

摘 要:【目的】解决我国西北地区土壤次生盐碱化问题。【方法】通过室内试验,对层状土上升毛管水运动特性进行 了分析,并考虑了含砂层层位和厚度共同变化影响下的毛管水运动特性变化规律,建立了地下水补给量、毛管水上 升高度随时间变化的函数关系,并进一步对其地下水补给量和毛管水上升高度等值线变化分布情况进行了对比分 析。【结果】含砂层层位与体积常数和高度常数之间有明显的正相关关系;与达到稳定时的地下水补给速率和毛管水 上升速率有明显的负相关关系,由于含砂层的作用,达到稳定时的地下水补给速率和上升速率与含砂层厚度有明显 的负相关关系;当地下水补给的时间持续在0~4 d、含砂层层位在30~50 cm之间变化、厚度在0~15 cm变化时,地下 水补给量和毛管水上升高度受二者的影响最为明显;当地下水补给的时间持续在4~12 d、含砂层层位在15~30 cm之 间变化、厚度在15~30 cm之间变化时,地下水补给量和毛管水上升高度受二者的影响最为明显。【结论】函数中拟合 参数体积常数v、稳定补给速率q^{*}、地下水补给时间常数To、决定了层状土地下水补给量的变化规律;毛管水上升高度 v、稳定补给速率q^{*}、上升高度时间常数To、决定了层状土毛管水上升高度的变化规律。

关键词:层状土壤;含砂层层位;含砂层厚度;上升毛管水

中图分类号:S275.3;S152.7

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20190048

汪顺生,翟士旭,傅渝亮,等.含砂层层位及厚度变化条件下层状土上升毛管水运动特性研究[J].灌溉排水学报, 2019,38(11):49-57.

0 引 言

土壤次生盐渍化的主要机制是在毛管力作用下地下水中可溶性盐分向表层土壤积累^[1]。寻找地下水埋 深较浅时影响土壤上升毛管水运动特征的主要因素,是改造潜水蒸发、灌排方式设计^[2-3]、减少和控制地下水 位及土壤盐渍化的根本^[4-6]。毛管水上升规律的研究对避免土壤盐渍化^[7-8]、指定生态水位^[9-10]和计算植物生态 需水量^[11-12]等具有重要意义。

目前国内外学者主要集中研究了均质土体中地下水埋深^[13]、颗粒级配^[14]、初始含水率^[15]、土壤中氯化钠 量^[16]等因素对于上升毛管水的运动特性的影响^[17-18];对于层状土体上升毛管水研究相对较少,王丁等^[19]通过 研究发现砂层对于土壤水分运动起到了明显的阻滞作用,并且对毛管水上升的高度、速率以及地下水补给 量有明显影响;史文娟等^[20]提出了沙质夹层影响毛管水最大上升高度的条件。层状土结构大自然中广泛存 在,与单一均质的土壤相比,其毛管水上升变化规律的区别在于层状土壤上下分界层面位置存在毛管障 碍^[21-23],故当前对非均质层状土壤上升毛管水运动特性规律,特别是开展多种因素共同影响下上升毛管水运 动过程随时间变化规律方面亟待研究。为此,通过室内土柱模拟试验,主要分析层状土上升毛管水运动特

收稿日期:2019-01-30

基金项目:河南省重点研发与推广专项(182102310049);国家自然科学基金项目(51479161,51779205,51779093);河南省高校科技创新团队支持计划项目(19IRTSTHN030);河南省高等学校重点科研计划项目(17B570002)

作者简介:汪顺生(1978-),男。博士,主要从事农业水土与环境研究。E-mail: wangshunsheng609@163.com

通信作者:傅渝亮(1985-),男。博士,主要从事节水灌溉与农业水土工程研究。E-mail: 42125548@qq.com

性,并进一步对含砂层层位与厚度在时间变化尺度上对上升毛管水运动特性的影响进行了研究。

1 试验方案与方法

本文重点对含砂层厚度和含砂层层位2个影响 ____ 因素进行分析,每个因素设置3个水平,含砂层厚度 ____ 分别取15、20、30 cm,含砂层层位是指地下水位位置 与粗砂层下边界距离,分别取15、30、50 cm;每组试 验设置3次重复,观测值取平均值。具体试验处理 如表1所示。

试验装置如图1所示。主要由供水系统与土柱 组成,供水系统利用马氏瓶自动供水,土柱高200 cm,内径17 cm,材料为有机玻璃;在土柱的边壁沿 垂向设有4排直径为2 cm的取土孔,孔中心间距为 ——

	表1 试验处理	
试验编号	含砂层层位 $h_{\#}$ /cm	含砂层厚度D/cm
1	15	15
2	15	20
3	15	30
4	30	15
5	30	20
6	30	30
7	50	15
8	50	20
9	50	30

5 cm,取土孔用橡皮塞塞住,用于试验期间采集土样,为减小某一边壁对水分运动的影响,含水率取4个取土 孔的平均值。层状土设计示意图如图2所示,试验设置地下水位埋深为2.0 m,含砂层采用砂壤土,土层采用 粉壤土。试验所用的粉壤土和砂壤土,经自然风干、碾压粉碎、过2 mm筛后,按照设计初始含水率加入一定 质量的清水充分拌和再用塑料薄膜包裹放置24 h,配置成试验用土。土壤饱和导水率采用定水头渗透仪法 测定^[24],初始含水率和饱和含水率采用烘干法测定,土壤的颗粒级配组成采用英国马尔文公司的Mastersizer-2000型激光粒度散射仪测定。土壤质地参数见表2,颗粒级配组成见表3。试验开始前,首先将土壤按相 应容重每5 cm一层进行装填,为避免水分蒸发,土壤装填完毕后在土壤表层覆盖塑料薄膜。试验一开始先 通过马氏瓶供水形成地下水,并利用马氏瓶进气孔来控制地下水位高度。实测时,每隔一定的时间,读取马 氏瓶读数并记录随时间变化的毛管水上升高度,



图1 试验装置示意图



图2 土层设计示意图

表2	试验	用土	:基	本	参	数

土壤类型	土壤体积质量/(g·cm-3)		饱和导水率 K _s /(cm·min ⁻¹)		饱和含水率 θ/(cm ³ ·cm ⁻³)		田间持水率/(cm ³ ·cm ⁻³)		
粉壤土	1.30		0.016 1			0.463		0.45	
砂壤土	1.40		0.018 0		0.430		0.39		
表3试验用土颗粒级配组成									
体积分数/%	粒级/mm								
	< 0.001	0.001~0.002	0.002~0.01	0.01~0.05	0.05~0.1	0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~2.0	
粉壤土	1.28	1.66	24.42	64.19	12.15	0.13	0.48	0.85	
砂壤土	1.23	3.06	3.84	6.88	12.31	34.56	24.96	18.15	

研究表明,具有砂质夹层的土壤连续函数入渗模型可采用电容充电模型^[25],在电容充电过程中,电压的 计算公式为:

$$V_{t} = E \left[1 - e^{\left(-\frac{t}{CR} \right)} \right],$$
(1)

式中:V;为任意电压值(v);E为电池充电极限值(v);CR为电阻与电容相乘。

习惯用时间常数*τ*=*CR*来度量时间,在*t*=τ时,电压达到充电极限的63%;在*t*=3τ时,电压达到充电极限的95%;在*t*=5τ时,电压达到充电极限的99%。可以认为,3~5τ以后,充电过程基本结束。

上升毛管水是指从土壤层下部沿土壤上升的水,毛管悬着水是指由地面进入土壤并被保持在土壤上部 毛管中的水分。本文仅对上升毛管水进行研究,文中所说的毛管水,是指上升的毛管水。尽管毛管水上升 过程与入渗过程补给水量的方向不同,毛管水向上补给,入渗水向下补给,但二者整个过程非常类似。因 此,二者均适用具有含砂层的层状土入渗条件下的电容充电电压计算公式^[26]。

2 结果与分析

2.1 均质土与层状土上升毛管水运动特性

图3是土壤体积质量为1.30 g/cm³、土壤初始含水率6,为0.08 cm³/cm³、砂层厚度D为20 cm、砂层埋深h_# 为30 cm等相同条件下,层状土壤的地下水补给量以及均质土壤的地下水补给量与时间的关系图。从图3 可以看出,层状土和均质土的地下水补给量均随时间增加,补给速率均随时间减少。当上升毛管水经历 2.5 h时,其上升高度达到砂层下界,而在2.5 h之前,层状土毛管水上升运动规律与均质土一致,补给量高, 补给速度快,并且地下水补给量与时间呈幂函数逐渐递增。在毛管水进入到夹砂层时,层状土与均质土的 地下水补给量随时间变化规律有很大的差异,层状土中的地下水补给量开始减少,即随时间变化的补给量 由非线性变化规律转化为线性关系(图3)。可以表明,毛管水穿过砂层下界面后,地下水补给速率基本不 变,说明此时毛管水上升过程开始进入缓慢上升阶段。但是当毛管水上升过程持续较长的时间时,地下水 补给速率会逐渐减小为0,此时的地下水补给量不随时间增加,此种状态的毛管水为悬着毛管水,由于本文 主要研究对象为上升毛管水,具体内容在此不做赘述。



图4显示了在相同条件下,层状土与均质中随时间变化的毛管水上升高度。由图4可知,从开始至2.5h, 层状土与均质土中毛管水上升高度均随时间呈非线性递增,上升速率较快,且2种情况的毛管水上升高度无 较大差异。当毛管水进入砂层时,夹砂层对毛管水的上升影响较大,层状土中毛管水上升速率明显慢于均 质土壤。说明层状土壤中2种土壤交界处存在较大的毛细屏障,主要原因是当毛管水上升刚到达砂壤土层 下界面时,下层粉壤土的含水率相对较小,此时上层砂壤土的进水吸力值仍小于下层粉壤土粉壤的土壤水 吸力;随着时间的推移,下层粉壤土的含水率不断增加,土壤水吸力逐渐减小,当其小于上层砂壤土的进水 吸力时,毛管水才会穿过土-砂交界面进入上层砂壤土,因此毛管水要穿过2种土层交界面需要一定的时间, 从整个土柱来看砂壤土与粉壤土的交界面处形成了断裂毛管水,使能量的输送产生突变现象,最终影响了 湿润锋运移。

由图3和图4可知,层状土与均质土中地下水补给量随时间呈非线性变化的数学函数为:

$$Q = v[1 - e^{(-\frac{t}{\tau_0})}],$$
 (2)

毛管水上升高度随时间呈非线性变化的数学函数为:

$$h = v[1 - e^{(-\frac{t}{\tau_{k}})}],$$
 (3)

51

对于地下水补给量缓慢增加的第2阶段,二者函数关系为:

地下水补给量:

$$Q^* = q^* \cdot t , \qquad (4)$$

毛管水上升高度:

$$h^* = \mu^* \cdot t , \qquad (5)$$

那么在2个阶段结合后的整个运动过程中,地下水补给量与毛管水上升高度变化的函数表达式可总 结为:

地下水补给量:

$$Q = v[1 - e^{(-\frac{t}{\tau_0})}] + q^* t , \qquad (6)$$

毛管水上升高度:

$$h = v [1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau_{h}}\right)}] + \mu^{*} t , \qquad (7)$$

式中: q^* 为缓增状态的地下水补给率(第2阶段)(cm/d); Q^* 为稳定状态时的地下水补给量(第2阶段)(cm); μ^* 为缓增状态的毛管水上升速率(第2阶段)(cm/d); h^* 为稳定状态时的毛管水上升高度(第2阶段)(cm);v为 土壤潜在孔隙补给体积常数;v为毛管水潜在上升高度常数; τ_0 为地下水补给时间常数(d); τ_h 为毛管水上升 时间常数(d)。

t=τ时,*Q*=v63%;*h*=v63%;*t*=3τ时,*Q*=v95%;*h*=v95%,3~5τ之后,地下水快速补给阶段结束。通过对数据进行整理分析发现,均质土与层状土中地下水补给量和毛管水上升高度关于时间的函数关系如下:

均质土:

$$Q = 23.18[1 - e^{\left(-\frac{t}{0.374}\right)}] + 1.541 \cdot t , \qquad (8)$$

$$R^{2} = 0.948 ; v_{PMCF} = 0.662$$

层状土:

$$Q = 8.126[1 - e^{\left(-\frac{t}{0.015}\right)}] + 0.257 \cdot t , \qquad (9)$$

$$R^{2} = 0.977 ; v_{RMSE} = 1.961$$

均质土:

$$h = 144.60[1 - e^{\left(-\frac{t}{0.514}\right)}] + 5.818 \cdot t , \qquad (10)$$

$$R^2 = 0.946 ; v_{RMSE} = 7.394$$

层状土:

$$h = 65.65[1 - e^{\left(-\frac{t}{0.015}\right)}] + 6.564 \cdot t , \qquad (11)$$
$$R^2 = 0.969 ; v_{RMSE} = 7.313$$

所有拟合方程的决定系数 R²都大于 0.93, 对应的均方差 v_{RMSE} 都小于 10。可认为该模型的适用性良好。 2.2 层状土中含砂层层位和厚度的变化对上升毛管水运动特性的影响

图5和图6分别显示了在砂层位置和厚度共同影响下的地下水补给量及毛管水上升高度与时间的关系。双因素共同影响下的地下水补量和毛管水上升高度随时间的变化都经历了"非线性"和"线性"2个变化阶段,具体为地下水补给量和毛管水上升高度都经历了快速增加的变化趋势(时间≤1 d),随后观测时间内,地下水补给量和毛管水上升高度呈现出稳定、缓慢增加的趋势。

从图5可以看出,在不同砂层层位条件下,地下水补给量在2个阶段均有较大的不同。第1阶段时,地下 水的补给能力随着砂层层位增加而变强,第2阶段时,地下水的补给能力随着砂层层位增加而变弱。砂层层 位较小时,地下水补给较快,毛管水迅速到达砂壤土与粉壤土的交界面,此时由于粉壤土的土壤含水率的迅 速增加,使其土壤水吸力逐渐减小,只有当土-砂交界处的土壤吸力值减小并达到砂壤土层的进水吸力值时, 毛管水才会穿过交界面缓慢地向上补给。砂层层位较大时,由于重力势作用,毛管水上升越高,其毛管水补 给速率逐渐减小,土-砂交界处的土壤吸力值要达到砂层土壤的进水吸力值需要较长的时间,所以砂层土壤 的阻渗性低于砂层层位较小的情况。因此,地下水补给量在砂层层位为50 cm 时最大,30 cm 时次之,15 cm 时最小。当上升毛管水进入缓慢上升阶段时,砂层中的毛管水重新进到上部粉质壤土,当含砂层层位较高 时,地下水补给量随时间变化的曲线斜率值在稳定补给阶段呈较小值。相反,当含砂层层位较低时,毛管水 稳定补给阶段地下水补给量随时间变化的曲线斜率呈较大值。



毛管水上升初期阶段,地下水补给量随时间变化的曲线受含砂层厚度影响差异不明显。但在第2阶段, 其影响较大,主要表现为,地下水补给量-时间的曲线斜率随着砂层厚度的增大而减小。根据史文娟等凹的 研究可知,砂层越厚,毛管水在砂层中停留的时间越长;且在水分进入平衡状态时,砂层上方的土壤含水率 变化与均质土壤相比较为相似。事实上,地下水补给进行到第2阶段时,砂层越厚,则穿过砂层进入到上方 土层的水分增量随含砂层厚度的增加而越小。地下水补给量与毛管水上升高度之间的变化关系可进行简 化为如下函数^[28]:

$$h = \frac{Q}{\theta_s - \theta_0},\tag{12}$$

式中: θ_s - θ_0 为平均土壤含水率增量(cm³/cm³)。

式(12)表明,层状土地下水补给量上升到相同高度时,上升毛管水穿过砂层进入土层后的土壤平均含 水率增量与补给量呈正比关系。

从图6可以看出,第1阶段时,砂层层位越大,毛管水上升高度越大。第2阶段时,砂层层位越大,毛管水 上升高度-时间曲线的斜率越小。在第1阶段时,毛管水上升速度较快,当砂层厚度改变时,毛管水上升速率 变化无差异(P>0.05)。在稳定补给阶段,砂层厚度越大,毛管水上升高度越大,毛管水上升速率越小。砂层 厚度为30 cm时,毛管水上升的速度最慢。

结合图5与图6,对地下水补给量和毛管水上升高度与时间的函数关系式中的参数进行了拟合,并将拟合参数和拟合优度汇总于表4。各拟合参数的决定系数 $R^2 > 0.918$,地下水补给量拟合参数的均方差 $v_{RMSE} < 0.24$,毛管水上升高度拟合参数的均方差 $v_{RMSE} < 2.30$,各个参数的拟合准确性较高,函数具备良好的适用性。为了考察含砂层层位 h_{24} 与含砂层厚度D两因素以及交互作用对各个拟合参数的显著性,对结果进行了方差分析。结果显示,含砂层层位对地下水补给量和毛管水上升高度的各参数均有极显著影响(P < 0.01),含砂层厚成对地下水补给量和毛管水上升高度的各参数均有极显著影响(P < 0.01),含砂层厚成对地下水补给量的各参数有极显著影响(P < 0.01),对毛管水上升时间常数 τ_h 与缓增状态的毛管水上升速率 μ 有极显著影响(P < 0.01)。交互项 $h_{24} \times D$ 对毛管水潜在上升高度常数v有显著影响(P < 0.05),对毛管水潜在上升高度常数v影响不显著(P > 0.05),对土壤潜在孔隙补给体积常数v有显著影响(P < 0.05),对其他拟合参数有极显著影响(P < 0.01)。

h _埋 / cm		补给量Q/cm					上升高度 <i>h/</i> cm					
	D/cm	/cm 拟合参数			拟合优度		拟合参数				拟合优度	
		$\tau_{\rm Q}/d$	v/cm	$q^*/(\operatorname{cm}\cdot\operatorname{d}^{-1})$	R^2	V _{RMSE}	$ au_{h}/d$	v/cm	$\mu^*/(\mathrm{cm}\cdot\mathrm{d}^{-1})$	R^2	V _{RMSE}	
	15	0.381	3.791	0.919	0.969	0.238	0.384	112.7	8.594	0.940	1.409	
15	20	0.523	4.544	0.539	0.951	0.218	0.257	111.6	5.763	0.939	0.496	
	30	0.674	5.309	0.234	0.983	0.224	0.124	115.2	1.204	0.974	2.282	
	15	0.343	5.839	0.245	0.989	0.215	0.203	118.8	6.742	0.979	0.359	
30	20	0.396	6.072	0.163	0.981	0.217	0.129	119.8	2.321	0.938	1.660	
	30	0.433	6.228	0.121	0.983	0.223	0.152	127.8	0.57	0.928	0.941	
1	15	0.354	8.351	0.076	0.930	0.206	0.133	131.0	2.207	0.960	1.352	
50	20	0.363	8.385	0.071	0.924	0.207	0.163	134.5	0.494	0.919	0.832	
	30	0.364	8.392	0.066	0.920	0.207	0.181	143.0	0.002	0.968	0.287	
- 方差分析_	h_{\pm}	$P=7.42 \times 10^{-12^{**}}$	$P=1.00\times10^{-14^{**}}$	$P=3.61 \times 10^{-21**}$	\	\	$P=7.09\times10^{-14^{**}}$	P=1.37×10 ^{-6**}	$P = 8.73 \times 10^{-19**}$	\	\	
	D	P=1.04×10 ^{-9**}	P=0.02×10 ^{-1**}	$P=3.19\times10^{-16^{++}}$	\	\	$P=2.55\times10^{-12^{**}}$	P=0.03*	$P=2.20\times10^{-20**}$	\	\	
	$h_{\#} \times D$	P=4.18×10 ^{-8**}	$P=0.14 \times 10^{-1^{*}}$	$P=8.20\times10^{-16^{**}}$	\	\	$P=2.81 \times 10^{-14^{**}}$	P=0.76 NS	$P=1.66 \times 10^{-13^{**}}$	\	\	

表4 地下水补给量和毛管水上升高度与时间之间拟合参数

注 在方差分析中**表示具有极显著影响(P<0.01);*表示具有显著影响(P<0.05);NS表示无显著影响(P>0.05)。

为了探求含砂层层位 h_型、砂层厚度 D 与 τ₀、ν、q*、τ_h、v、μ²之间的相关关系,运用了 Pearson 分析法,其结果 如表5 所示。由表5 可知,砂层层位与土壤潜在孔隙补给体积常数v 和毛管水潜在上升高度常数v 明显正相 关(P<0.01);而当达到线性稳定补给阶段时,砂层层位与毛管水稳定上升速率及地下水稳定补给速率存在较 为明显的负相关(P<0.05)。砂层厚度只在缓慢补给阶段影响较大,并且与地下水缓慢补给速率以及毛管水 缓慢上升速率之间存在明显的负相关。

指标	$h_{\#}$	D	$ au_{ m Q}$	v	q^{*}	\mathcal{T}_h	U	μ^{*}
h_{\pm}	1							
D	0	1						
$ au_{ m Q}$	-0.630	0.505	1					
v	0.960**	0.158	-0.44	1				
q^*	-0.716*	-0.793*	0.118	-0.822**	1			
$ au_{ m h}$	-0.466	-0.437	-0.168	-0.620	0.918**	1		
υ	0.914**	0.327	-0.486	0.916**	-0.706*	-0.446	1	
μ^{*}	-0.765*	-0.720*	0.155	-0.862**	0.956**	0.848**	-0.819**	1

表5 拟合参数之间的相关关系

2.3 砂层层位与厚度对地下水补给量等值线随时间的变化特性的影响

为了进一步了解砂层层位和厚度在什么时间段对地下水补给量的影响最为显著,对比分析了不同时间 (2、4、8、12 d)地下水补给等值线的分布规律(图7)。由图7可知,不同时间地下水补给等值线的分布规律是 不同的。砂层层位和厚度对地下水补给量产生影响的时间分布也不同。

在毛管水上升运动持续2d时,含沙层厚度的变化对地下水补给量等值线的影响不明显;而当砂层层位 变化时地下水补给量等值线呈阶梯状,说明砂层层位的变化对地下水补给量的影响显著。砂层层位在35~ 50 cm之间时,地下水补给量的等值线分布密度较大,地下水补给量受砂层层位变化的影响更为敏感。

地下水补给量的分布规律在4d及以后时,随含砂层厚度的增加而减小。当砂层层位在15~30 cm之间时,砂层厚度的变化使得地下水补给等值线呈阶梯状,影响较为显著;随着砂层层位的增加(30~50 cm),地下水补给量等值线基本不受含砂层厚度变化的影响。

当含砂层厚度和含砂层层位均分布在15~20 cm时,其地下水补给量12 d时达到峰值。





2.4 砂层层位与厚度对毛管水上升高度等值线随时间变化特性的影响

对不同时间(2、4、8、12 d)的毛管水上升高度等值线分布情况进行对比,结果见图8。由图8可知,砂层 层位与厚度对毛管水上升高度等值线分布的影响都比较显著。

在毛管水上升运动持续2d时,砂层层位在15~30 cm之间、砂层厚度在15~20 cm之间时,毛管水上升高 度随着砂层厚度的变化呈阶梯状分布,说明此时砂层厚度的变化对毛管水上升高度的影响最为明显;而当 砂层厚度为20~30 cm之间时,砂层厚度的变化基本不对毛管水上升高度的等值线分布产生影响。当砂层层 位在30~50 cm之间时,毛管水上升高度的等值线随着砂层层位的变化呈阶梯状分布,说明此时砂层层位的 变化对毛管水上升高度的影响较大。

当上升毛管水上升运动持续4~12 d时,毛管水上升高度等值线分布受砂层厚度的影响逐渐增大,在12 d时,砂层层位在15~20 cm之间、砂层厚度在15~20 cm之间时,毛管水上升高度达到最大值。



图8 毛管水上升高度等值线分布图

3 讨论

由于本文仅对上升毛管水进行了分析,并未对悬着毛管水进一步的分析,因此未能确定不同层状土埋 深和厚度的变化对毛管水的极限上升高度影响,其次,从表5相关性分析结果可以看出,地下水埋深(h₂)的 变化虽然对 τ₀影响相关性不显著,但是却对 ν/τ₀比值的变化影响很大,经对比发现,采用电容充电模型模拟 均质土毛管水上升过程(式(8)),其 ν/τ₀等于 61.97 cm/d,其值与实测均质土饱和导水率 K_s为 64.37 cm/d 相

比,平均偏差值仅为3.7%,与真实值基本一致,因此可以通过*v/t*₀拟合值间接求得均质土饱和导水率,当接近 或等于土壤饱和导水率时,认为地下水补给速率基本为0,并且毛管水上升高度*h*已达到极限高度;另一方 面,当采用电容充电模型模拟层状土毛管水上升过程时,由于层状土毛管水上升过程中远比均质土的复杂 得多,仅此还需进一步做补充试验,验证*v*/t₀与*h*₂和*D*之间的量化关系。

4 结 论

1)通过分别改变含砂层层位和厚度,使整个毛管水上升过程中的地下水补给量随时间发生了两个阶段 变化,具体分为非线性地下水补给阶段和线性稳定补给阶段。得出了层状土整个上升毛管水运动过程中地 下水补给量随时间变化的函数关系式以及毛管水上升高度随时间变化的函数关系式;模型的拟合精度较 高,适用性较好。

2)通过相关性分析发现,在毛管水快速上升的第1阶段,砂层层位对地下水补给量和毛管水上升高度有积极影响,而地下水补给量不受砂层厚度的影响,毛管水上升高度亦是如此;第2阶段,含砂层层位、含砂层 厚度越大,其地下水稳定补给率和毛管水稳定上升速率反而越小。

3)毛管水上升运动持续0~4d时,地下水补给量和毛管水上升高度受含砂层层位变化的主要影响范围 集中在砂层层位为30~50 cm之间;地下水补给量和毛管水上升高度受含砂层厚度变化的主要影响范围集中 在砂层厚度为0~15 cm之间。毛管水上升运动持续4~12 d时,地下水补给量和毛管水上升高度受含砂层层 位变化的主要影响范围集中在15~30 cm之间;而二者受含砂层厚度变化的主要影响范围集中在砂层厚度为 15~30 cm之间。

参考文献:

- [1] 王合云,李红丽,董智,等.滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J].土壤学报,2015,52(3):706-712.
- [2] 肖辉,程文娟,潘洁,等.滨海盐土不同改良方式对土壤盐碱及白蜡生长的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(6):45-50.
- [3] 张震中,张金旭,黄佳盛,等.不同排水措施对青海高寒区盐碱地改良效果的研究[J].灌溉排水学报,2018,37(12):80-87.
- [4] 张金珠,虎胆•吐马尔白,王振华,等.不同深度秸秆覆盖对滴灌棉田土壤水盐运移的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(3):37-41.
- [5] WU Jianhua, LI Peiyue, HUI Qian, et al. Assessment of soil salinization based on a low-cost method and its influencing factors in a semi-arid agricultural area, northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(8): 3 465-3 475.
- [6] LI Qifei, MIN Xi, WANG Qinggai, et al. Characterization of soil salinization in typical estuarine area of the Jiaozhou Bay, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2018, 103.
- [7] RICHARDS J H, CALDWELL M M. Hydraulic lift: Substantial nocturnal water transport between soil layers by Artemisia tridentata Roots[J]. Oecologia, 1987, 73(4): 486-489.
- [8] 何兴东,高玉葆. 干旱区水力提升的生态作用[J].生态学报,2003(5):996-1002.
- [9] JESUS J, CASTRO F, NIEMELÄ A, et al. Evaluation of the impact of different soil salinization processes on organic and mineral soils[J]. Water Air & Soil Pollution, 2015, 226(4): 1-12.
- [10] VERVOORT R W, SJOERD E Z. Simulating the effect of capillary flux on the soil water balance in a stochastic ecohydrological framework[J]. Water Resources Research, 2008, 44(8): 335-349.
- [11] 周金龙,刘丰,侯江涛,等.新疆平原非灌区自然植被生态耗水量的计算[J].干旱区资源与环境,2006(4):162-165.
- [12] 张丽,董增川,赵斌.干旱区天然植被生态需水量计算方法[J].水科学进展,2003,14(6):745-748.
- [13] 刘伟佳,吴军虎,裴青宝,等.不同地下水埋深条件下均质土壤毛管上升水运动特性试验研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):67-70.
- [14] 张平,吴昊,殷洪建,等.颗粒级配对毛细水上升影响的研究[J].节水灌溉,2010(7):24-26.
- [15] 乔莲莲.污水灌溉地下水环境效应试验研究[D].西安:西安理工大学,2008.
- [16] 刘建军,程东娟,于振红.土壤氯化钠含量对毛管水上升特性影响研究[J].节水灌溉,2011(2):8-10.
- [17] 魏样,王益权,蔡苗,等.石油污染对土壤毛细水上升特性的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(9):50-56.
- [18] 阚常庆. 保水剂对沙质土毛管水上升特性影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- [19] 王丁,费良军.层状土壤上升毛管水运移特性试验研究[J].地下水,2009,31(1):35-37.
- [20] 史文娟,沈冰,汪志荣,等.层状土壤毛管水最大上升高度分析[J].干旱地区农业研究,2007(1):94-97.
- [21] 罗焕炎,严蔼芬,谢驹华.层状土中毛管水上升的实验研究[J].土壤学报,1965(3):312-324.
- [22] 吉恒莹. 土壤质地层状性和水质对土壤侵蚀影响的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [23] CHO K W, KYUNG G S, CHO J W, et al. Removal of Nitrogen by a layered soil infiltration system during intermittent storm events[J]. Chemosphere, 2009, 76(5): 690-696.
- [24] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

[25] 张建丰,王文焰,贾中华.具有砂质夹层的土壤连续函数入渗模型[J].水土保持学报,2007,21(4):94-97.

[26] 陈琳,费良军,傅渝亮,等.不同土壤温度和容重下微咸水上升毛管水运动特性 HYDRUS 模拟及验证[J].水土保持学报,2018,32(6):87-96,185.

[27] 史文娟,汪志荣,沈冰,等. 夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J].水土保持学报,2004,18(6):167-170.

[28] 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.

Study on the Variation Characteristics of Rising Capillary Water of Layered Soil under Variation of Sand Layer and Thickness

WANG Shunsheng¹, ZHAI Shixu¹, FU Yuliang^{1,2*}, FEI Liangjun³

(1.North China University of Water Resources and Electric Powe, Zhengzhou 450046, China;

2.Xi'an University of Technology, Xi'an 7100048, China;

3.Institute of Water Resources Research, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] The purpose of this paper is to solve secondary salinization of soil in Northwest China. [Method] the capillary water rising movement characteristics of layered soil has been analyzed through indoor test. And the variation characteristics of capillary water movement under the influence of common change of layer and thickness of sand layer has been considered in this paper, and functional relationship between groundwater recharge and height of capillary water rising with time changing has been built. Furthermore, contour distribution of groundwater recharge and capillary water rising height has been also comparative analyzed. [Result] There was a very significant positive correlation between the horizon and the volume constant and the height constant (P<0.01). And there was a significant negative correlation between the horizon and the stable recharge rate of groundwater and the rate of steady increase of capillary water (P < 0.05). There was a significant negative correlation between the thickness of sand layer and stable recharge rate and steady rising rate (P < 0.05). When the duration of the capillary water height was rising was $0{\sim}4$ days, the sandy layer was $30{\sim}50$ cm, the thickness of sand layer was 0~15 cm, which has a significant effect on the change of groundwater recharge and height of capillary water. When the duration of the capillary water height was rising was 4~12 days, the sand layer is distributed in $15 \sim 30$ cm, the thickness of sand layer was $15 \sim 30$ cm, which has a significant effect on the change of groundwater recharge and height of capillary water. To summarize, the results of this study were of great significance for the study of water salt movement and soil salinization in layered soils. [Conclusion] The fitting parameters of the function including volume constant (v), stable recharge rate (q^*), groundwater recharge time constant (τ_0), capillary water rising height (v), steady rising rate (μ^*) and rising height time constant (τ_h) were determined by the variation of capillary groundwater recharge and capillary water height with time changing respectively. Key words: layered soil; the sand layer position; sand layer thickness; rising capillary water

责任编辑:赵宇龙