

矿化度对微润灌土壤入渗特性的影响*

牛文全^{1,2} 薛万来^{1,3}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用室内土箱模拟试验的方式,研究了5种矿化度条件下微润灌土壤水分的入渗特性。试验结果表明:矿化度对湿润体形状影响小,微润灌湿润体横剖面呈近似圆形;矿化度对湿润体体积影响较大,矿化水湿润体体积大于清水的湿润体体积。当矿化度为3 g/L时,微润灌湿润体湿润锋运移速率最大,湿润锋运移速率与时间呈幂函数关系。矿化水可增加微润灌的累计入渗量,但累计入渗量与矿化度之间不是单调关系,当矿化度为3 g/L时,累计入渗量达到最大,土壤平均含水率也最大。

关键词: 矿化度 湿润锋 入渗 微润灌溉

中图分类号: S279.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0163-10

引言

微润灌溉是一种连续灌溉技术,应用半透膜作为输水管,通过地理方式将水缓慢输送到作物根区,是一种全新地下灌溉技术^[1]。由于其节水效果显著、抗堵塞性能强^[2],近年来在农业生产中得到广泛运用。然而,作为一种新兴灌溉技术,目前还缺乏完整的灌溉技术参数和灌溉制度。土壤湿润体的形状、大小及含水率分布等是确定灌溉制度的重要依据。另外,高矿化度水灌溉越来越多^[3-4],水中盐分离子与土壤颗粒发生化学反应,将改变土壤孔隙特征及化学组成,进而影响土壤的入渗特性^[5]。

Boyko 研究认为,许多作物可利用矿化水进行灌溉,在砂土上甚至可以利用海水灌溉^[6]; Muhammad Ashraf 等研究认为,利用地下微咸水易造成植物根区矿化度的升高^[7];小麦、玉米等谷物利用矿化度为4.5~5.5 g/L的地下水进行灌溉后,取得了很好的效果^[8]。近年来,国内也对矿化水的利用开展了大量研究,王全九等^[9]研究了土壤初始含水量对微咸水入渗特征的影响,认为在低含水量时,土壤累计入渗率随初始含水量的增加而增加,在高含水量时则不明显,土壤饱和和导水能力随初始含水量的增加而增加;吴忠东等^[10]研究认为可用一维代数模型精确模拟微咸水入渗过程;王春霞等^[11]通过田间试验研究了滴头流量和

水质对微咸水湿润锋的影响,得出水平湿润锋距离和交汇区宽度及地表湿润比均随滴头流量的增大而增加;雪静等^[12]研究了间歇入渗条件下微咸水的入渗特征,结果显示间歇入渗能够增加湿润深度,第一周期吸湿率最大,以后吸湿率逐步减小并趋于稳定。上述研究是在滴灌等流量较大的灌水方式下进行的,而微润灌流量小,采用持续供水方式,与上述供水量和供水方式完全不同。因此,本文以微润灌为供水方式,研究不同矿化度下,微润灌的土壤入渗特征,从而为微咸水微润灌溉应用提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 土样及水质

试验土壤取自陕西渭河三级阶地,取土深度为从表层至40 cm,将取得的土壤风干、碾压、均匀混合,过2 mm筛后制成室内试验土样。土壤颗粒组成采用MS2000型激光分析粒度仪(英国马尔文公司)测定,结果如表1所示。按国际制土壤分类方法,土壤类型为粘壤土。试验用水质由化学试剂配制而成,主要是根据关中地区(浦城卤阳湖地区)地下微咸水盐分组成特点,用NaHCO₃、Na₂SO₄、MgSO₄、MgCl₂和CaCl₂配置而成,不同矿化度离子组成和浓度如表2所示,且钠吸附比保持在14(mmol/L)^{1/2}左右。

表1 供试土样基本性质

Tab.1 Physical properties of tested soil

土壤	不同粒径的颗粒组成/%			容积密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	田间持水量 /%	饱和含水率 /%
	砂(2~0.02 mm)	粉(0.02~0.002 mm)	粘(<0.002 mm)			
粘壤土	32.064	56.088	11.848	1.35	23.6	39.0

表2 不同矿化度水质化学组成

Tab.2 Ion content of water with different mineralization degrees

矿化度	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
2.0	0.429 8	0.081 4	0.072	0.276 2	0.624 6	0.516 0
2.5	0.537 2	0.101 8	0.090	0.345 2	0.780 8	0.645 0
3.0	0.644 7	0.122 1	0.108 0	0.414 3	0.936 9	0.774 0
3.5	0.752 0	0.142 5	0.126 0	0.483 4	1.093 1	0.903 0
5.0	1.074 5	0.203 5	0.180 0	0.690 5	1.561 5	1.290 0

1.2 试验装置

试验装置由土箱和供水装置组成(图1)。试验土箱由厚度为10 mm的有机玻璃制成,箱体规格为120 cm×50 cm×50 cm(长×宽×高)。土箱两侧面有直径为25 mm的对称小孔(离土箱上边沿250 mm,侧边沿15 mm)。供水装置为马氏瓶,主要提供恒定压力水头,其横截面积为25 cm²,高为70 cm。入渗装置为微润带,为双层结构,直径为25 mm,内层为厚度0.06 mm的特制半透膜,表面采用化学溶解方式,形成均匀而密集的微孔,微孔直径为10~900 nm,孔密度约为10万个/cm²,外层为无纺布保护层增加微润带的强度。微润带长度与土箱长度均为120 cm,进口端连接供水系统,出口端封闭,试验土箱与马氏瓶由橡皮软管连接。

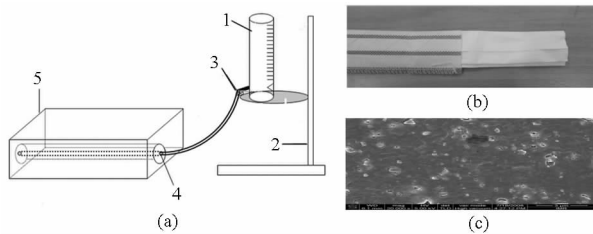


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental equipment

(a) 试验装置 (b) 微润带

(c) 半透膜微孔分布示意图(2万倍电镜图)

1. 马氏瓶 2. 可移动支架 3. 进水管 4. 微润带 5. 试验土箱

1.3 试验方法及测定内容

试验设定5种矿化度,分别为2.0、2.5、3.0、3.5和5.0 g/L,以清水(矿化度0 g/L)作为对照。微润带埋深为15 cm,压力水头设置为180 cm,将试验土样(容积密度为1.35 g/cm³,风干含水率为2.9%)装入土箱,层间打毛,以便于充分接触,表面用塑料膜覆盖,防止土壤水分蒸发。试验过程中记录不同时刻湿润锋的轮廓和马氏瓶的水位线。微润

带充水埋入土后,立即开始用秒表记录灌水时间,按照先密后疏的原则,入渗时间达72 h时停止供水,同时立刻用1 cm土钻取样,取样点位置距离微润管带5 cm,沿管带垂直方向进行,间距为5 cm,用干燥法测定土壤含水率。

试验结束后,用硫酸纸描下湿润锋运移轨迹,记录湿润锋坐标并计算湿润体范围。湿润锋运移速率为单位时间内运移距离,时间间隔与记录时间一致,累计入渗量根据马氏瓶刻度和横截面积计算,平均入渗率为单位时间内累计入渗量。

本试验各处理均重复3次,试验数据取其平均值,采用SPSS作回归模型分析、Excel作湿润体形状、湿润锋运移及水分分布的图形。

2 结果与分析

2.1 对湿润形状和大小的影响

湿润体形状和大小与土壤质地、土壤容积密度、土壤初始含水率、灌水时间和灌水量等众多因素有关^[13-17]。试验过程中为了方便观测湿润体的特性,选取湿润体横剖面的1/2作为研究对象,用不同灌水时刻的湿润锋水平半径 R ,垂直向下运移距离 H ,垂直向上运移距离 X 描述湿润体的形状和大小变化。图2为矿化度0、2.0、2.5、3.0、3.5和5.0 g/L时,湿润锋运移变化过程,图中坐标(0,0)点为微润带所在位置。

从图2可看出,入渗水矿化度对湿润体形状影响较小,各处理微润灌湿润体横剖面均近似为圆形。在入渗初期9 h内,各处理垂直(向上、向下)、水平方向湿润锋运移距离接近;9~30 h,各处理垂直向下运移距离略大于向上运移距离,但水平运移距离与垂直运移距离(向上、向下)差距始终不大,湿润锋水平最大运移距离与微润带保持在同一水平面;入渗30 h至结束,各处理湿润锋运移距离在3个方

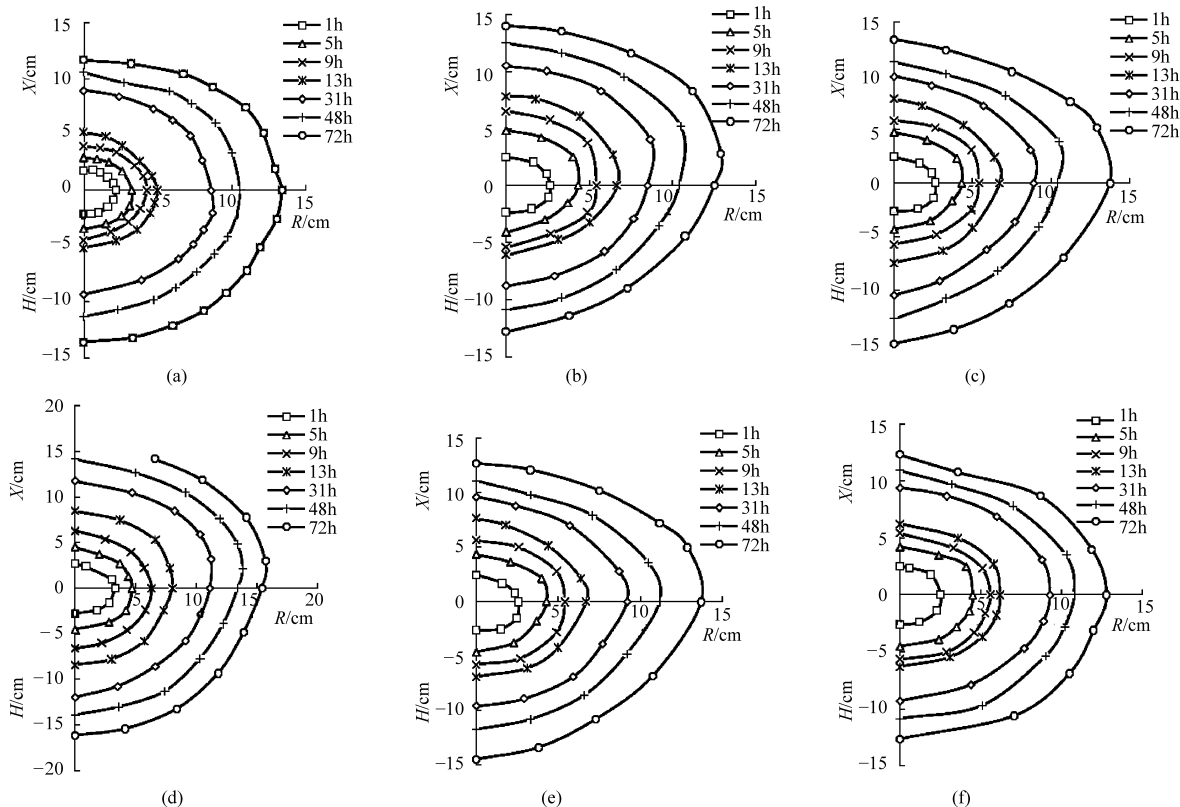


图2 不同矿化度下土壤湿润锋运移动态变化

Fig.2 Wetting front variation of different mineralization degrees

(a) 0 g/L (b) 2.0 g/L (c) 2.5 g/L (d) 3.0 g/L (e) 3.5 g/L (f) 5.0 g/L

向上基本相同,差异非常小。所以,微润灌溉湿润体形状最终形成以微润带为轴心的近似“圆柱体”。

虽然矿化度对湿润体形状影响不大,但对湿润体大小的影响却很大。由图2可知,在相同入渗时间内,各处理的湿润体体积差异较大,入渗水矿化度对土壤湿润体体积具有明显影响。入渗结束时,矿化度为3.0 g/L的湿润体体积最大,0 g/L的湿润体体积最小,说明湿润体大小与矿化度之间非单纯的递增或者递减关系,而存在易于土壤水分扩散的最佳矿化度。这是因为入渗水矿化度不同,土壤孔隙特征发生差异性变化,从而影响土壤水分运动通道的差别,最终导致土壤湿润体体积的差异。由于微润灌溉土壤湿润体的形状为近似“圆柱体”,因此湿润体体积为

$$V = a\pi t^b L \quad (1)$$

式中 V ——土壤湿润体体积, m^3
 t ——灌水时间, h a, b ——拟合参数
 L ——微润带线源长度, m

根据试验结果,对不同矿化度下土壤湿润体体积用式(1)进行拟合,结果如表3所示。

根据式(1)可以预测不同时刻湿润体体积变化情况,结果如表4所示。由表4可知,式(1)可以较好地预测不同灌水时间下湿润体体积,且误差范围

表3 不同入渗水矿化度下参数 a, b 的拟合值

Tab.3 Fitting parameters of a and b under different mineralization degrees

矿化度/($g \cdot L^{-1}$)	a	b	R^2
0	3.287	0.862	0.971
2.0	6.503	0.150	0.995
2.5	6.980	0.774	0.994
3.0	7.784	0.810	0.987
3.5	6.531	0.764	0.995
5.0	6.265	0.138	0.995

都在8%以下。

2.2 对湿润锋运移规律的影响

2.2.1 对水平湿润锋运移的影响

通过不同矿化度入渗试验发现,入渗结束时(72 h),矿化度为3.0 g/L入渗水水平湿润锋运移距离最大,达到15.48 cm。矿化度为0、2.0、2.5、3.5和5.0 g/L入渗水的水平湿润锋运移距离相当,分别为12.40、12.84、13.84、13.74和12.80 cm。图3为不同矿化度条件下水平最大湿润锋运移规律,6种矿化度入渗水的水平最大湿润锋运移规律基本一致,湿润锋在入渗初期运移速率较快,后期逐渐变缓。在整个入渗过程中,3.0 g/L入渗水的水平湿润锋运移距离始终最大,2.5 g/L的水平湿润锋运移距离次之,3.5 g/L的运移距离略小于2.5 g/L,

表4 湿润体体积实测值与预测值对照

Tab.4 Comparison between predicted and measured wetted soil volumes

矿化度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	31 h			48 h			72 h		
	实测值/ m^3	预测值/ m^3	误差/%	实测值/ m^3	预测值/ m^3	误差/%	实测值/ m^3	预测值/ m^3	误差/%
0	0.0299 ± 0.002	0.0287	4.01	0.0432 ± 0.003	0.0442	2.31	0.0594 ± 0.001	0.0610	2.69
2.0	0.0324 ± 0.006	0.0331	2.16	0.0519 ± 0.009	0.0482	7.13	0.0704 ± 0.008	0.0655	6.96
2.5	0.0392 ± 0.002	0.0401	2.30	0.0536 ± 0.006	0.0511	4.64	0.0745 ± 0.009	0.0702	5.77
3.0	0.0510 ± 0.005	0.0501	1.76	0.0763 ± 0.008	0.0710	6.58	0.0975 ± 0.009	0.0913	6.36
3.5	0.0346 ± 0.001	0.0351	1.45	0.0480 ± 0.003	0.0487	0.62	0.0667 ± 0.006	0.0701	2.10
5.0	0.0328 ± 0.003	0.0324	1.22	0.0444 ± 0.001	0.0436	1.80	0.0598 ± 0.002	0.0585	2.17

注:表中实测值 0.0299 ± 0.002 表示3次实测数据的平均值 \pm 标准差。

0 g/L入渗水的运移距离最小,在入渗初期0.5~3 h内,2.0 g/L入渗水的水平湿润锋运移距离大于0 g/L和5.0 g/L的运移距离,而在5 h至入渗结束,5.0 g/L入渗水的水平湿润锋运移距离逐渐大于

0 g/L和2.0 g/L的运移距离。说明矿化水灌溉能够增强土壤水分的传导,但对于某一特定土壤存在一个最佳土壤水分传导的矿化度范围。

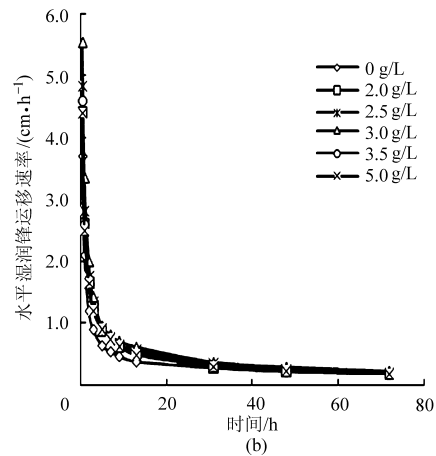
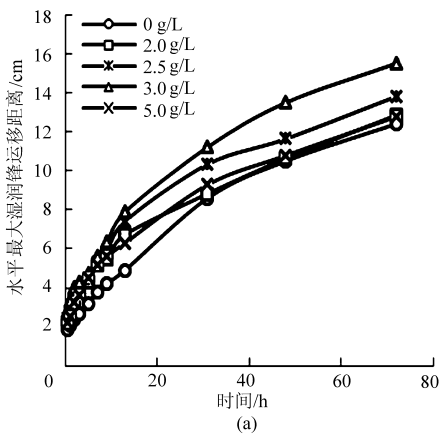


图3 水平最大湿润锋运移规律

Fig.3 Level wetting front migration rule

从图3b可看出,不同矿化度土壤水平湿润锋运移速率与时间呈幂函数关系(表5),不同矿化度入渗水水平最大湿润锋运移速率之间有一定差异,在入渗初期,不同矿化度之间入渗速率差异较大,其中3.0 g/L入渗水的水平入渗速率为5.54 cm/h,明显大于0 g/L的清水;而在入渗后期各处理之间水平湿润锋的运移速率变化平稳且差异较小。同时清水处理的水平运移指数略大于矿化水,矿化度对水平运移指数影响较小且矿化水的运移指数平均为0.363,而矿化水灌溉时水平运移系数明显大于清

水,其中矿化度为3.0 g/L时,水平运移系数最大,为3.111。

2.2.2 对垂直向下湿润锋运移规律的影响

图4为不同矿化度下的垂直向下最大湿润锋运移规律。由图4a可知,垂直向下运移距离也随着入渗时间的延长而增大,且入渗初期湿润锋运移速率较快,后期逐渐变慢。从入渗开始至结束,矿化度为3.0 g/L入渗水垂直向下运移距离最大,为16.94 cm,2.5 g/L入渗水的运移距离次之。在入渗前30 h,矿化度为0 g/L的运移距离最小,其中入渗前9 h,湿润锋垂直向下运移距离由大到小依次为3.5、5.0、2.0、0 g/L,9~30 h,湿润锋垂直向下运移距离由大到小依次为2.0、3.5、5.0、0 g/L;30 h至入渗结束,矿化度为5.0 g/L的运移速率减慢,运移距离变为最小,这与水平方向运移距离略有差异。由此可见,矿化度对增强入渗所起的积极作用和钠吸附比增加对入渗所起消极作用的平衡点发生在入渗30 h前后,即粘粒膨胀可逆过程的平衡点出现在入渗30 h前后^[18]。

表5 不同入渗水矿化度下水平湿润距离与时间关系的拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of level wetting front migration distance with time under different mineralization degrees

矿化度/ $(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	系数	指数	R^2
0	1.921	0.404	0.968
2.0	2.624	0.357	0.994
2.5	2.784	0.365	0.987
3.0	3.111	0.358	0.974
3.5	2.646	0.368	0.991
5.0	2.565	0.366	0.993

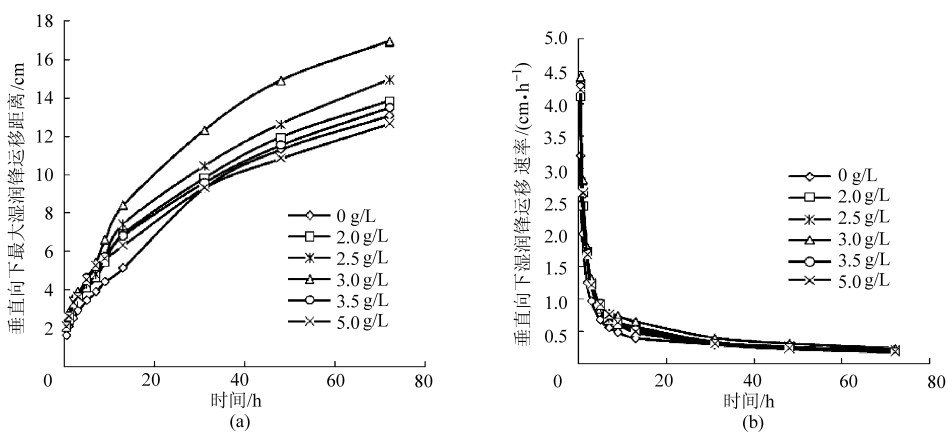


图 4 垂直向下最大湿润锋迁移规律

Fig. 4 Vertical downward wetting front migration rule

从图 4b 可看出,不同矿化度湿润锋垂直向下运移速率随时间变化趋势大致相同,入渗初期,各处理入渗速率较大且变幅大,随着入渗时间延长,运移速率逐渐变小,最后趋于稳定。3.0 g/L 入渗水向下运移速率始终最大,入渗前 30 h,0 g/L 入渗水的向下运移速率最小,随后 5.0 g/L 入渗水的向下运移距离逐渐小于 0 g/L,但 2.0、2.5 和 3.5 g/L 入渗水的向下运移速率差异不大,这与湿润锋水平运移速率随时间变化趋势较为相似。且不同矿化度湿润锋垂直向下运移速率与时间也呈幂函数关系(表 6),清水 0 g/L 的垂直向下运移指数大于矿化水,而矿化水的垂直向下运移系数明显大于清水。对于矿化水灌溉,当矿化度为 3.0 g/L 时,垂直向下运移系数和指数均最大。

2.2.3 对垂直向上湿润锋运移规律的影响

微润灌溉是用地理的方式将灌溉水输送到土壤,土壤中的水分在土壤吸力的作用下也会向地表扩散,因此,湿润锋垂直向上运移规律的研究也是土壤湿润体特征研究的重要内容。图 5 是不同矿化度条件下,湿润锋垂直向上运移规律。由图 5a 可知,6 种矿化度下湿润锋垂直向上运移规律大致相同,

均随着灌水时间的延长,逐渐向地表扩散,湿润锋运移速率也都是先快后慢。与湿润锋水平和垂直向下运动相同的是 3.0 g/L 入渗水的垂直向上运移距离也始终最大,达到 15.82 cm;2.0 g/L 入渗水的运移距离次之;相比湿润锋水平和垂直向下运移规律,垂直向上运动中,湿润锋运移规律更加清晰,相同入渗时间下,湿润锋运移距离由大到小依次为 2.5、3.5、5.0、0 g/L。至入渗结束,矿化度 0、2.0、2.5、3.0、3.5 和 5.0 g/L 湿润锋垂直向上运移距离分别为 11.63、14.30、13.36、15.82、12.68 和 12.34 cm。

表 6 不同入渗水矿化度下垂直向下湿润距离与时间关系的拟合参数

Tab. 6 Fitting parameters of vertical downward wetting front migration distance with time under different mineralization degrees

矿化度/(g·L ⁻¹)	系数	指数	R ²
0	1.865	0.435	0.988
2.0	2.435	0.395	0.986
2.5	2.592	0.401	0.992
3.0	2.694	0.418	0.985
3.5	2.584	0.379	0.994
5.0	2.580	0.365	0.996

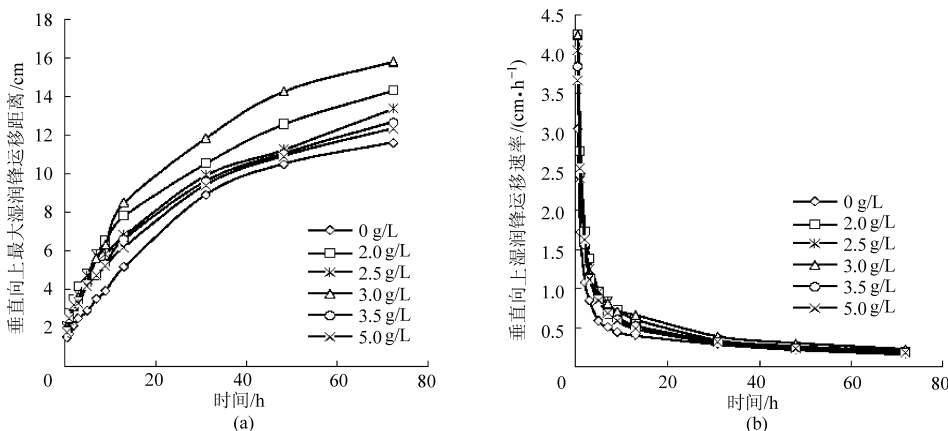


图 5 垂直向上最大湿润锋迁移规律

Fig. 5 Vertical upward wetting front migration rule

从图 5b 可以看出,在入渗初期,湿润锋垂直向上运移速率较大,随着入渗时间的延长,运移速率逐渐减少,最后趋于稳定。在整个入渗过程中,清水(0 g/L)的湿润锋垂直向上运移速率最小。同时垂直向上运移速率与时间也呈幂函数关系(表 7),垂直向上运移指数随着矿化度的增加而减小,清水灌溉的垂直向上运移指数最大,而清水的垂直向上运移系数明显小于矿化水,垂直向上运移系数随着矿化度增加呈先增大而后减小趋势,当矿化度为 3.0 g/L 时最大,为 2.587。

表 7 不同入渗水矿化度下垂直向上湿润距离与时间关系的拟合参数

Tab.7 Fitting parameters of vertical upward wetting front migration distance with time under different mineralization degrees

矿化度/(g·L ⁻¹)	系数	指数	R ²
0	1.651	0.452	0.981
2.0	2.567	0.437	0.992
2.5	2.568	0.412	0.992
3.0	2.587	0.406	0.993
3.5	2.417	0.400	0.988
5.0	2.361	0.385	0.993

2.3 对累计入渗量的影响

图 6 是不同矿化度条件下土壤累计入渗量随时间变化关系。由图 6 可知,随着灌水时间的延长,各处理土壤累计入渗量不断增加。相同入渗时间下,矿化水处理累计入渗量均大于清水 0 g/L 处理,其中矿化度 3.0 g/L 累计入渗量始终最大,其次为 2.5 g/L 和 3.5 g/L;在入渗前 30 h,矿化度 2.0 g/L 的累计入渗量大于 5.0 g/L 的累计入渗量;30 h 至入渗结束,矿化度 5.0 g/L 的累计入渗量不断增加,最终大于 2.0 g/L 处理。至入渗结束时,矿化度为 0、2.0、2.5、3.0、3.5 和 5.0 g/L 入渗水的累计入渗量分别为 833、893、1 171、1 389、984 和 979 mm。说明

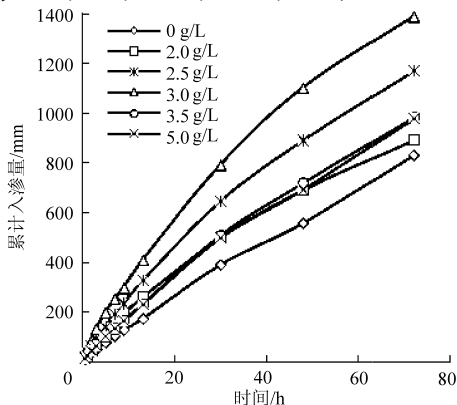


图 6 不同矿化度累计入渗量随时间变化关系
Fig.6 Cumulative infiltration curves vs time

矿化水可以增加微润灌的累计入渗量,并在矿化度为 3.0 g/L 时,达到最大值。

不同矿化度下累计入渗量与入渗时间变化关系显著,如图 7 所示,符合 Kostiakov 入渗模型,入渗系数约为 33.11;入渗指数为 0.806,变幅绝对值小于 6.36%,大于湿润锋运移指数,因此,水分入渗衰减速度要小于湿润锋运移的衰减速度,这与肖娟等^[19]研究的负压灌溉条件下水质对累计入渗量影响的规律较为一致。

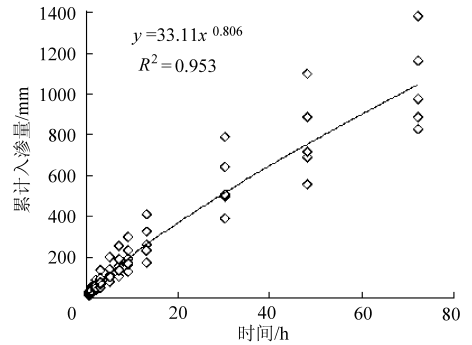


图 7 累计入渗量与时间的关系

Fig.7 Relationship between cumulative infiltration and time

图 8 是不同矿化度下土壤入渗率随时间变化关系。从图 8 可看出,不同处理土壤入渗率随时间的变化趋势相同,从开始入渗很短时间内曲线由陡峭逐渐变平缓,最终趋近于某一定值即稳定入渗率。在整个入渗过程中,矿化度小于 3.0 g/L 时,土壤入渗率与矿化度呈正相关关系,且矿化度 3.0 g/L 时入渗率最大;当矿化度大于 3.0 g/L 时,随矿化度的升高土壤入渗率呈减小趋势。在入渗前 3 h,矿化度为 3.5 g/L 入渗水的入渗率大于 2.0 g/L,随后 2.0 g/L 入渗水的入渗率逐渐大于 3.5 g/L。但矿化水可以提高土壤的入渗能力,矿化度为 0 g/L 时,入渗率最低,这一结论与吴忠东等^[20]模拟结果一致。至入渗结束,土壤稳定入渗率由大到小依次为 3.0、2.5、3.5、5.0、2.0、0 g/L。土壤入渗率的这一变化,反映了入渗水矿化度不仅能改变了土壤水分的特性,而且会改变土壤的结构特性。

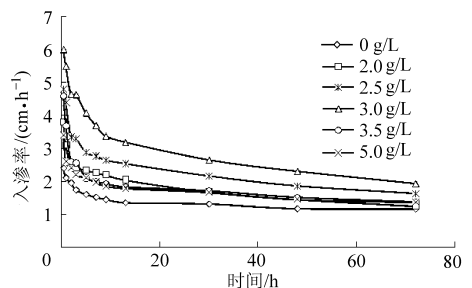


图 8 不同矿化度下入渗率随时间变化

Fig.8 Soil infiltration rate vs time infiltrated by different mineralization degrees

2.4 对土壤含水率分布的影响

入渗水矿化度的不同导致土壤入渗特征的差异,也必然影响土壤含水率的分布。图9是入渗结束时,距离微润管带水平方向5 cm处,垂直方向上不同矿化度条件下土壤含水率的实测值,据此绘制的土壤含水率分布图。由图9可以看出,入渗水矿化度对土壤含水率的分布有较大的影响,土壤含水率的极大值均出现在管带附近,并向四周逐渐减小;微润管上部(大于-15 cm)土壤含水率,当矿化度小于3.0 g/L时,土壤含水率随矿化度的升高而增加,矿化度大于3.0 g/L时,土壤含水率由大到小依次为5.0、3.0、3.5 g/L,矿化度为5.0 g/L的土壤平均含水率比矿化度为0、2.0、2.5、3.0和3.5 g/L的土壤平均含水率分别高44.77%、25.59%、13.96%、3.86%和17.41%;微润管下部(小于-15 cm),当矿化度小于3.0 g/L时,土壤含水率随矿化度的升高而增加,矿化度大于3.0 g/L时则相反。经计算,入渗水矿化度为0、2.0、2.5、3.0、3.5和5.0 g/L湿润体的平均含水率分别为17.32%、19.61%、22.08%、22.96%、21.93%和21.65%,土壤平均含水率的极大值出现在矿化度3.0 g/L的处理中,矿化度为0 g/L的清水处理则最小。

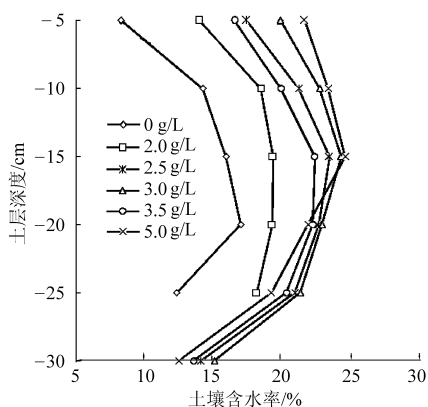


图9 不同矿化度下土壤含水率分布

Fig. 9 Soil water content distribution under different mineralization degrees

3 讨论

3.1 矿化度对微润灌湿润体形状的影响

矿化度对微润灌湿润体形状影响较小,各处理湿润体横剖面都近似为圆形。这是因为:在入渗初期,土壤含水率较低,入渗水中的离子与土壤表面颗粒相互作用较弱,溶质势作用较小,此时土壤水分运动主要为基质势的作用,而本次试验是在均质土上进行,土壤各方向上基质势梯度相差不大,土壤大孔隙中的优先流(流动面积随土壤深度的变化明显,且流动不连续,流动发生在水平和垂直方向上)和

相对均匀的基质流动均未完全发育,因此,此时各处理土壤水分在各方向上流动较为均匀^[21],湿润体横剖面近似为“圆形”;在入渗中期,土壤重力势增大,垂直向下运移距离 H 大于垂直向上运移距离 R 和水平运移距离 X ,但重力势增加幅度并不大,因为微润灌溉是被动供水方式,且可以根据膜内外水势梯度自动调节出流量,所以3个方向上差异不大;随着入渗时间延长,入渗水量不断增加,土壤中溶质势所起作用增大,但对于同一处理,溶质势作用基本相同,此时土壤大孔隙和周围土壤基质之间的水量交换加强,土壤基质流动加强,土壤水流均匀性逐渐增加^[22],所以至入渗结束,湿润锋3个方向上 $R:X:H$ 约为1:1:1,湿润体形状横剖面为近似圆形,湿润体近似为“圆柱状”。这与地下滴灌^[23]湿润体横剖面形状为椭圆形明显不同,因为地下滴灌为主动供水方式,且出流量大,随着灌水时间延长,土壤重力势会显著增大,导致湿润锋向下运移速率明显增大,向下运移距离大于其他方向,最终湿润体形状为“椭球体”。此外,本次试验湿润体形状为“圆柱状”,可能与所用土壤质地也有关,试验是在粘壤土上进行,土壤粘粒含量相对较多,且为均质土,孔隙分布较为均匀,因此土壤水势梯度在各方向上差异较小。

3.2 矿化度对湿润锋运移规律的影响

矿化度对微润灌湿润锋运移具有显著的影响,至入渗结束时,湿润锋在3个方向上运移距离基本以3.0 g/L为拐点,呈先增大后减小的趋势。这一结论与吴忠东等^[20]利用微咸水积水入渗模拟的结论一致,这是因为入渗水矿化度对土壤水分入渗特征的影响主要是通过土壤粘粒膨胀这一可逆过程来实现的^[18]。在入渗初期,进入土壤中的水分较少,因而钠吸附比不大,此时随着土壤溶液盐分浓度的增加,扩散双电子层向粘粒表面压缩,土壤颗粒之间的排斥力降低,矿化度对入渗的影响主要表现为粘粒的絮凝作用,这样有助于形成团粒结构,导致土壤有效孔隙增多,使得土壤导水能力增加,所以盐离子在某种程度下可以增强土壤导水和持水能力^[24],所以在入渗初期,矿化水处理湿润锋运移距离均大于清水0 g/L处理;但随着矿化度的升高,进入土壤中的 Na^+ 数量也随之增加(表2), Na^+ 是引起土壤退化的主要盐分,由于离子电荷少,半径相对较大,水化能较小, Na^+ 会置换胶体颗粒上的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,致使土壤交换性钠百分比达到很高的程度^[25],引起土壤颗粒的膨胀和分散,被分散的粘粒随入渗进入土壤孔隙连续体中,引起土壤孔隙的堵塞,极大地改变孔隙大小分配,此时钠吸附比的增加对土壤的破坏作用已超过矿化度的增加所带来的有

利作用,使土壤的透水性变差,导致土壤入渗能力下降^[26-27],由此可见,土壤的导水和持水能力是由入渗水矿化度和进入土壤溶液中 Na^+ 数量共同决定。

3.3 矿化度对累计入渗量及水分分布的影响

矿化水处理的累计入渗量显著大于清水 0 g/L 处理,说明利用矿化水灌溉,在一定程度上能够增加土壤的入渗量。前面所述湿润锋运移规律很好地解释了这一现象,土壤溶液中盐分浓度的增加能够促进土壤水分运动,所以矿化水处理的累计入渗量大于清水处理;但并不是矿化度越大累计入渗量就越大,这是因为随着入渗时间的延长,进入土壤中的 Na^+ 增多,进而导致土壤粘粒的膨胀,堵塞土壤孔隙,影响水分入渗性能,最终导致矿化度 5.0 g/L 处理的累计入渗量低于 3.0 g/L。由此可见,矿化水灌溉增加土壤水分入渗性能存在一个最适矿化度范围。

由于累计入渗量的不同必然导致土壤含水率分布的差异,湿润体内含水率分布范围为 8.3% ~ 24.6%,矿化度为 0、2.0、2.5、3.0、3.5 和 5.0 g/L 湿润体的平均含水率分别为 17.32%、19.61%、22.08%、22.96% 和 21.65%,3.0 g/L 处理的平均含水率最大,且最接近田间持水量。单从水分利用的角度来看,本次试验条件下 3.0 g/L 处理是最

优的,当然本次试验是在室内并在均质粘壤土上得出的结论。所以,在实际运用中还需在更大范围内进行研究,同时还要结合不同作物类型及作物不同生育阶段来合理选择灌溉水矿化度,同时考虑土壤质地、耕作方式及气候条件等因素,以达到既有效利用矿化水,保证土壤质量,又促进作物增产增收的效果^[28]。

4 结 论

(1) 微润灌溉条件下湿润体横剖面为近似圆形,矿化度对湿润体形状影响较小,而对湿润体大小有显著影响。入渗结束时,矿化度为 3.0 g/L 的湿润体体积最大,提高入渗水矿化度能够增加土壤湿润体体积。

(2) 矿化度对湿润锋运移距离和速度有较大的影响,矿化水能增强土壤水分在不同方向上的运移速率,增大运移距离,矿化度为 3.0 g/L 时,湿润锋在各方向的运移距离最大。

(3) 矿化水灌溉能够增加土壤累计入渗量,累计入渗量以矿化度 3.0 g/L 为拐点呈先增大后减小的变化趋势。土壤含水率在微润管带附近最大,并向湿润体四周逐渐减小,3.0 g/L 处理的湿润体平均含水率最大。

参 考 文 献

- Quiñones-Bolaños E, Zhou H, Soundararajan R, et al. Water and solute transport in pervaporation hydrophilic membranes to reclaim contaminated water for micro-irrigation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2005, 252(1-2): 19-28.
- 杨文君,田磊,杜太生,等. 半透膜节水灌溉技术的研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2008, 19(6): 60-63.
Yang Wenjun, Tian Lei, Du Taisheng, et al. Research prospect of the water-saving irrigation by semi-permeable film[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2008, 19(6): 60-63. (in Chinese)
- 王丹,康跃虎,万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 83-87.
Wang Dan, Kang Yuehu, Wan Shuqin. Distribution characteristics of different salt ions in soil under drip irrigation with saline water [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(2): 83-87. (in Chinese)
- 王艳娜,侯振安,龚江,等. 咸水资源农业灌溉应用研究进展与展望[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(2): 393-397.
Wang Yanna, Hou Zhen'an, Gong Jiang, et al. Development and expectation of utilization of saline water resources in agriculture irrigation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(2): 393-397. (in Chinese)
- Xiao Zhenhua, Prendergast B, Rengasamy P. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic conductivity [J]. *Pedosphere*, 1992, 2(3): 237-244.
- Boyko H. Saline irrigation for agriculture and forestry[M]. Hague: Dr W. Junk. N. V. Publishers, 1968:325.
- Muhammad Ashraf, Muhammad Mazharsaeedz. Effect of improved cultural practices on crop yield and soil salinity under relatively saline ground water applications [J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2006, 20(1): 111-124.
- 郭永杰,崔云玲,吕晓东,等. 国内外微咸水利用现状及利用途径[J]. *甘肃农业科技*, 2003(8): 3-5.
- 王全九,叶海燕,史晓楠,等. 土壤初始含水量对微咸水入渗特征影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 51-53.
Wang Quanjiu, Ye Haiyan, Shi Xiaonan. Influence of initial water content on slight saline water infiltration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 51-53. (in Chinese)
- 吴忠东,王全九. 利用一维代数模型分析微咸水入渗特征[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 21-26.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Infiltration characteristics of brackish water by one dimensional algebraic model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(6): 21-26. (in Chinese)
- 王春霞,王全九. 微咸水滴灌下湿润锋运移特征研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 59-68.
Wang Chunxia, Wang Quanjiu. Research on the transport characteristics of soil wetting front under drip irrigation with saline water

- [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2010, 24(4): 59–68. (in Chinese)
- 12 雪静, 王全九, 毕远杰. 咸水间歇供水土壤入渗特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 14–19.
Xue Jing, Wang Quanjiu, Bi Yuanjie. Soil infiltration properties with slight saline water intermittent application[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 14–19. (in Chinese)
- 13 张俊, 牛文全, 张琳琳, 等. 微润灌溉线源入渗湿润体特性试验研究[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(6): 32–38.
Zhang Jun, Niu Wenquan, Zhang Linlin, et al. Experimental study on characters of wetted soil in moistube irrigation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(6): 32–38. (in Chinese)
- 14 肖娟, 雷廷武, 李光永. 水质及流量对盐碱地滴灌湿润锋运移影响的室内试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 88–91.
Xiao Juan, Lei Tingwu, Li Guangyong. Laboratory experiment study on the effects of water quality and emitter discharge on wetted soil geometry and volume[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(2): 88–91. (in Chinese)
- 15 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.
Li Mingsi, Kang Shaozhong, Sun Haiyan. Relationships between dripper discharge and soil wetting pattern for drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(4): 32–35 (in Chinese)
- 16 张振华, 蔡焕杰, 郭永昌, 等. 滴灌土壤湿润体影响因素的实验研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3): 17–20.
Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, Guo Yongchang, et al. Experimental study on factors effecting soil wetted volume of clay loam under drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(3): 17–20. (in Chinese)
- 17 王成志, 杨培岭, 任树梅, 等. 保水剂对滴灌土壤湿润体影响的室内实验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 1–7.
Wang Chengzhi, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Laboratory experiment on the effects of super absorbent polymer on wetting front of drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(12): 1–7. (in Chinese)
- 18 肖娟. 水质对盐碱地水盐耦合迁移和作物生长影响的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- 19 肖娟, 江培福, 郭秀峰, 等. 负水头条件下水质对湿润体运移及水盐分布的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 101–107.
Xiao Juan, Jiang Peifu, Guo Xiufeng, et al. Effect of water quality on wetting front moving and salt-water distribution under negative hydraulic head[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 101–107. (in Chinese)
- 20 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 64–69.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 64–69. (in Chinese)
- 21 王康, 张仁铎, 周祖昊. 土壤性质对入渗再分布影响的显色示踪试验研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 577–582.
Wang Kang, Zhang Renduo, Zhou Zuhao. Experimental study on effects of soil properties on infiltration redistribution using combined tracers of dye and iodine[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 577–582. (in Chinese)
- 22 王康, 张仁铎, 周祖昊, 等. 土壤非均匀水流运动和溶质迁移显色示踪方法研究[J]. *土壤学报*, 2009, 46(4): 603–610.
Wang Kang, Zhang Renduo, Zhou Zuhao, et al. Evaluation of method for visualization of heterogeneous soil water flow and solute transport using iodine-starch staining[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 603–610. (in Chinese)
- 23 王超, 李援农. 地下滴灌条件下湿润体特性的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2011(3): 38–40.
- 24 肖振华, 万洪富. 灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响[J]. *土壤学报*, 1998, 35(3): 359–366.
Xiao Zhenhua, Wan Hongfu. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic and physical properties [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 359–366. (in Chinese)
- 25 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.
- 26 柯夫达·V A, 沙波尔斯·I. *土壤盐化和碱化过程的模拟*[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- 27 McNeal B L, Coleman N T. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity[J]. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1966, 30: 308–312.
- 28 Abdel Gawad G, Arslan A, Gaihbe A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1–2): 39–53.

Effects of Mineralization Degrees on Soil Infiltration under Moistube-irrigation

Niu Wenquan^{1,2} Xue Wanlai^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to explore the impact of mineralization degrees on infiltration character of soil under moistube-irrigation, an indoor soil box simulation experiment method was used to investigate the infiltration character of soil water under five different mineralization degrees selectively. Results indicated that the degree of mineralization had small impact on the shapes of soil wetted zone, and the wetting front shape were similar to circle. Degree of mineralization had a relatively bigger influence on the volume of wetted soil. The volume of wetted soil in mineralized water was bigger than that in pure water. When the degree of mineralization was 3 g/L, the wetting front (horizontal, vertical up and down) migration distance was the farthest, which had a power function relationship with time. The mineralized water could increase cumulative infiltration. However the relationship between cumulative infiltration and degree of mineralization was not linear relationship. The cumulative infiltration and average soil moisture content was the biggest when the degree of mineralization was 3 g/L. The results of this study provided reference for the utilization of moistube-irrigation with mineralized water.

Key words: Mineralization degrees Wetting front Infiltration Moistube-irrigation

(上接第 54 页)

Complex Collision Model in High-speed Gripping of Fruit

Liu Jizhan¹ Bai Xinxin¹ Li Pingping² Mao Hanping¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education,

Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: This paper focused on the special collision phenomenon of fruit gripping with its own characteristics of continuous energy input and restrained deformation. The gripping collision process was divided into three stages: constant-speed loading, collision decelerating and stress relaxation, and a three-stage gripping collision model was put forward under the conditions of constant static loading capacity and constant speed control mode, which was based on the stage dynamic characteristic of gripping collision process and viscoelastic Burger's model of fruits. It was proved by test that the prediction of the peak collision force was feasible, and the prediction error under initial gripping speed of 19.2 mm/s was 1.12%. By calculating with this model, it was found that time needed to grip fruit in different ripe period under initial speed of 6 mm/s was 0.62 ~ 1.24 s, and further raising the initial speed might have very limited effectiveness to improve the gripping efficiency. The peak collision force and fruit deformation were proportional and approximately proportional to initial gripping speed, respectively. Probability of skin rupture increased greatly with initial gripping speed. When initial gripping speed was under 20 mm/s, probability of skin rupture of green ripening stage and early red ripening stage were the greatest and the least, respectively. This three-stage gripping collision model may provide helpful reference to discover the special law of gripping collision and to achieve high-speed safe gripping of fruits.

Key words: Fruit Viscoelastic High-speed gripping Collision Model