

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.019

负水头条件下水质对湿润体运移及水盐分布的影响*

肖娟¹ 江培福² 郭秀峰¹ 邱照宁¹ 范肖予³

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048;
3. 山西农业大学林学院, 太谷 030801)

摘要: 通过室内试验,分析了负水头供水条件下,灌溉水钠吸附比和盐分浓度对湿润体运移及水盐分布的影响。结果表明,湿润体的最大水平湿润距离、最大垂直湿润距离以及累积入渗量均与时间呈幂指数关系,并随着灌溉水盐分浓度的增加和钠吸附比的减小而增加;湿润体内土壤含水率和电导率的分布近似为一组同心椭球面,并与湿润体半椭圆在水平方向的半轴平方呈线性关系,随着半轴的增加,土壤含水率减小,而电导率增加;灌溉水盐分浓度一定的条件下,随着钠吸附比的增加,湿润体内的平均含水率减小,平均电导率增加,在钠吸附比一定的条件下,灌溉水盐分浓度对两者的影响较小。

关键词: 负水头灌溉 水质 钠吸附比 湿润体 水盐分布

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)05-0101-07

Effect of Water Quality on Wetting Front Moving and Salt-water Distribution under Negative Hydraulic Head

Xiao Juan¹ Jiang Peifu² Guo Xiufeng¹ Qiu Zhaoning¹ Fan Xiaoyu³

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
2. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China
3. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Effect of the sodium adsorption ratio (SAR) and salt concentration of irrigated water on soil water infiltration and salt-water distribution in wetted soil volume under negative hydraulic head were analyzed by laboratory experiments. Results indicated that the relationships between each next parameter and time, maximal horizontal wetted distance (X), maximal vertical wetted distance (Z), and accumulated infiltration (I) were a power function. X , Z and I increased with the increasing of salt concentration and decreasing of SAR. The distribution of water content and electric conductivity in wetted soil volume could be described as a series of concentric ellipsoid, and had the linear relationship with the square of semi-axis of ellipse (A^2). With the increasing of A , water content decreased and electric conductivity increased in wetted soil volume. With the increasing of SAR, average soil water content decreased and average electric conductivity increased under certain salt concentration. Salt concentration had no significant impact on average soil water content and average electric conductivity under certain SAR.

Key words: Negative hydraulic irrigation Water quality Sodium adsorption ratio Wetted soil volume Salt-water distribution

引言

负水头灌溉技术的可行性已经在理论和实践上

得到了验证^[1-5]。通过室内负水头灌溉试验研究,得到了不同供水水头、不同灌水器、不同土壤等条件下,单个灌水器下湿润体形状、水分入渗以及含水率

收稿日期: 2012-11-05 修回日期: 2012-11-29
* 山西省科技攻关资助项目(20120311019-6)和山西省高校科技开发资助项目(2010104)
作者简介: 肖娟,副教授,主要从事节水灌溉研究,E-mail: zhangxd626@163.com
通讯作者: 江培福,高级工程师,主要从事农业水土工程、水资源管理研究,E-mail: jiangpeifu@iwhr.com

分布的规律^[6-9],为负压灌溉灌水器间距的确定以及作物种类的选择提供了理论依据。田间试验研究表明,负水头灌溉更适于温室及大棚蔬菜栽培体系中。进行负水头灌溉供水,土壤含水率呈非饱和状态,可抑制土表湿润导致的无效蒸发和地下渗漏导致的无效灌溉和养分流失;也不会破坏土壤结构,节省了人力、物力,提高了水分利用率^[3]。然而,有关负水头灌溉的研究中,却很少考虑灌溉水质的影响。而灌溉水质对非饱和土壤水分入渗有很大影响,非饱和水力传导度随着土壤溶液盐分浓度的减小和钠吸附比的增大而减小^[10-12]。关于滴灌条件下水质对湿润体的水盐运移和分布影响的研究有很多^[13-14],但缺乏针对负压灌溉条件下灌溉水质对湿润体特征参数影响的研究。随着咸水资源在灌溉实践中的广泛应用,有必要对咸水负压灌溉进行研究。目前世界上广泛使用含盐量(矿化度或电导率)和钠吸附比对灌溉水质进行评价^[15]。本文主要研究灌溉水质对负水头条件下湿润体的运移以及水盐分布的影响,以期为负压灌溉田间试验提供一定的依据。

1 材料和方法

1.1 试验装置

试验装置为三棱柱有机玻璃土箱,底为腰长35 cm、夹角30°的等腰三角形,高40 cm。假设土壤质地均匀,水分在土壤中的运动分布轴对称,则此装置可以模拟实际情况的1/12。试验装置如图1所示。采用马氏瓶恒压供水,利用马氏瓶的进水口与灌水器的相对高度来控制负压灌溉的供水水头(H),同时在马氏瓶侧面标上刻度来记录灌水量变化。假设水源水面与灌水器齐平时,供水水头 $H=0$,水源水面低于灌水器时, H 为负值。灌水器(孔径3~4 μm ,尺寸5 cm×3 cm×2.5 cm)为透水不透气的多孔陶土板材料。采用内径为6 mm的橡皮输水管将各装置接牢,使系统在试验过程中处于密封状态,且每次试验开始时须检验密封性。

1.2 试验土壤及灌溉水质

供试土壤采自山西省太谷县,经碾压、粉碎、风

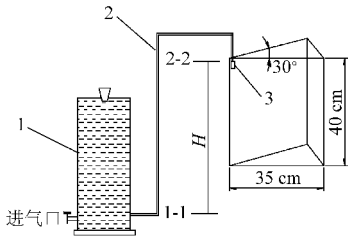


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental device

1. 马氏瓶 2. 软管 3. 灌水器

干、过筛(2 mm)后,按控制容重1.5 g/cm³分层均匀装入。土壤砂粒(粒径0.02~2 mm)占54.21%,粉粒(粒径0.002~0.02 mm)占29.65%,黏粒(粒径0~0.002 mm)占16.14%。初始含水率为2.3%。

灌溉水的水质一般是通过水的盐分浓度(C)和钠吸附比(溶液中 Na^+ 浓度与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度之和的平方根的比值)来决定。本试验灌溉水的水质根据NaCl和 CaCl_2 的比例进行人工配置,不同水质配比计算结果见表1。

表1 水质配制计算结果

Tab.1 Results of water quality preparation

钠吸 附比	盐分浓度 C / $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	NaCl 质量浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	CaCl_2 质量浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
30	80	4 095	555
	20	1 123.2	44.4
	2	116.5	0.55
20	80	3 568.5	1 054.5
	20	1 070.55	94.35
	2	115.83	1.11
10	80	2 515.5	2 053.5
	20	877.5	277.5
	2	112.905	3.885

1.3 试验设计及试验方法

利用负压灌溉装置,依次进行供水水头 $H=-1.5\text{ m}$ 时,不同钠吸附比(30、20、10)、不同盐分浓度(80、20、2 mmol/L)的负压灌溉试验,并以纯净水灌溉作为对照处理。在有机玻璃的表面贴有透明胶片,记录不同入渗时间湿润锋动态变化过程。在试验过程中记录不同入渗时刻的马氏瓶水位变化,得出不同入渗时间对应的累积入渗量 I 。每个试验处理重复3次,并取其平均值作为分析数据。

试验结束后迅速用直径为2 cm的土钻按图2所示(图中剖面为棱柱体土槽的中心纵剖面)取样,为了取得湿润锋处的样品,最末一个取样点到前一个取样点的距离有可能小于5 cm。取样后用加热干燥法测量各样点土壤含水率。同时取干土10 g,按照体积比1:5的土水比配制浸提液,用DDS-11A型数显电导率仪测量土壤溶液的电导

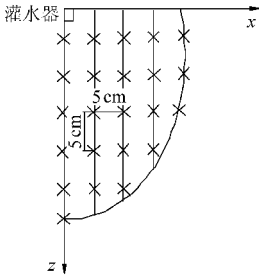


图2 取样点的分布

Fig.2 Distribution of selective points

率。

1.4 试验过程及原理

该系统在水源高程低于灌水器高程(供水水头为负值)情况下,无需动力加压设备,自动补给实现灌溉。如图1所示,首先关闭马氏瓶的进气口和供水口,然后注满水并排出空气。用塞子塞住注水口,使其完全密闭。然后打开进气口,使得进气口和空气相通,待进气口没有水流出时,打开供水阀门(1-1断面)。假设以灌水器所在平面(2-2断面)为参考平面,坐标向上,则供水水源处(1-1断面)的总水势 $\psi_1 = H$ (重力势),因为水源水面位于灌水

器下方,所以1-1断面的重力势在零以下。灌水器(2-2断面)周围土壤水的总水势为 $\psi_2 = \psi_m + \psi_s$,基质势 ψ_m 和溶质势 ψ_s 均为负值。在不考虑其他损失情况下,只要 $\Delta\psi = H - (\psi_m + \psi_s) > 0$,就可以在水源与灌水器周围土壤之间形成势差,水流就可以实现从水源到土壤和植物的灌溉。

2 结果和分析

2.1 水平湿润距离和垂直湿润距离

不同处理湿润体的最大水平湿润距离 X 和最大垂直湿润距离 Z 随时间 t 的变化过程见图3、4。

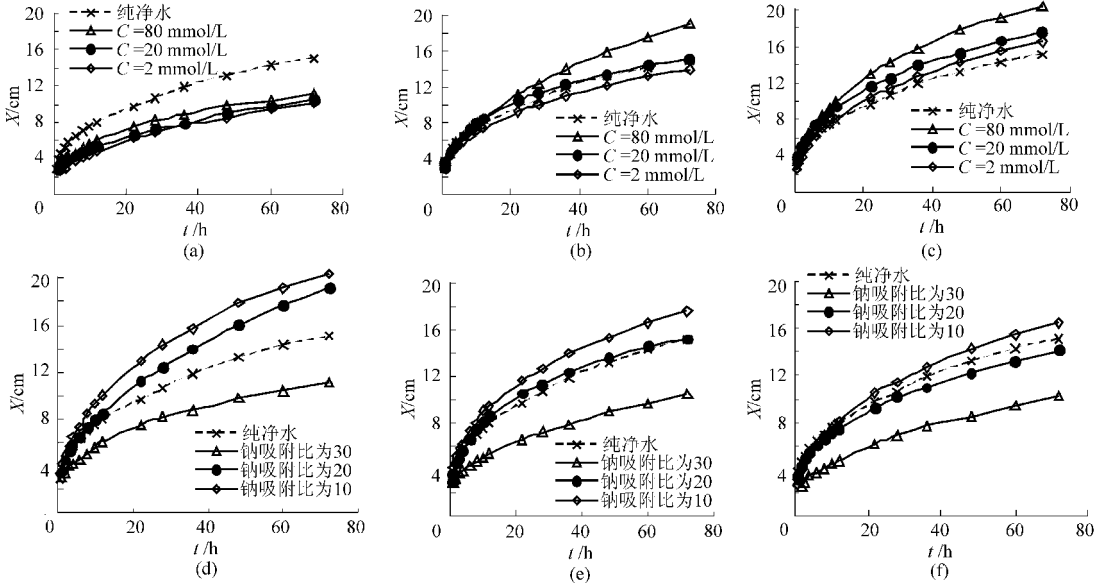


图3 最大水平湿润距离随时间的变化

Fig. 3 Maximal horizontal wetting distance vs moving time

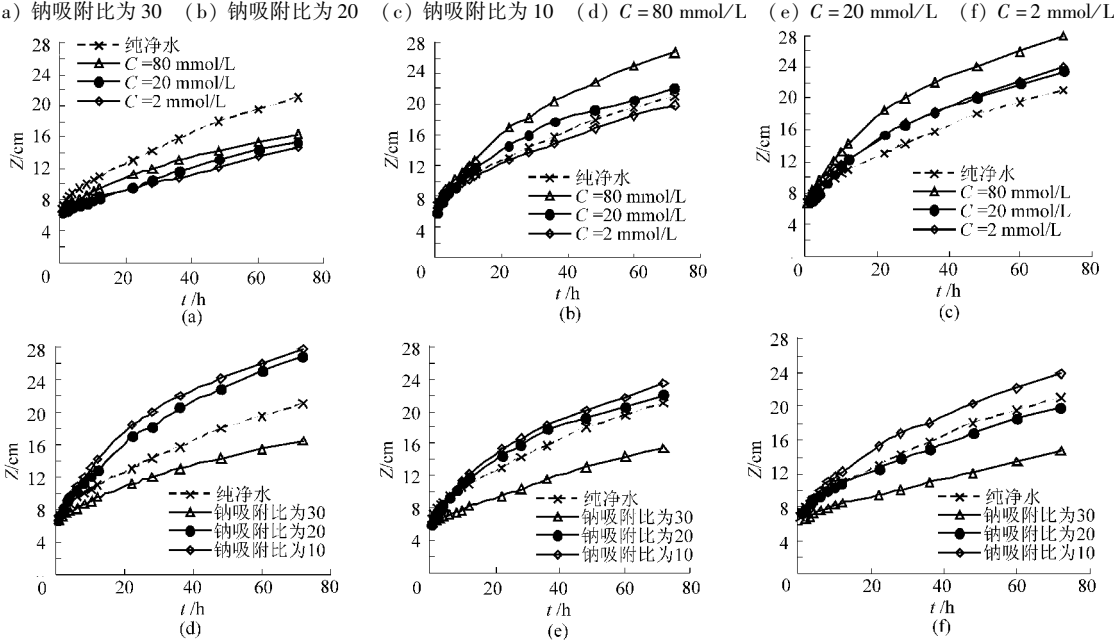


图4 最大垂直湿润距离随时间的变化

Fig. 4 Maximal vertical wetting distance vs moving time

(a) 钠吸附比为30 (b) 钠吸附比为20 (c) 钠吸附比为10 (d) $C = 80 \text{ mmol/L}$ (e) $C = 20 \text{ mmol/L}$ (f) $C = 2 \text{ mmol/L}$

由试验可知, X 、 Z 和 t 之间的关系可以用幂函数来表示,即 $X = at^b$ 或 $Z = at^b$,拟合参数见表 2。

由图 3 和图 4 可知,各处理 X 和 Z 都随着时间的增加而增加,但增加幅度逐渐减弱,最后趋于停止。这是因为在灌溉水质一定时,土壤水的溶质吸力不变,灌水器周围土壤的总水势仅受到基质势的

影响。供水水头 H 一定时,灌溉开始时的灌水器周围土壤初始含水率很小(2.3%),土壤的基质势很小,吸力很大,因此 X 和 Z 在开始时增加很快。随着时间的推移,与灌水器接触的土壤含水率增加,土壤水的基质势增加,吸力减小,因此 X 和 Z 增加的速度减小。

表 2 X 、 Z 和 I 与时间 t 的拟合情况
Tab. 2 Fitting of X , Z and I with time t

灌溉水质	X/cm			Z/cm			I/mL		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
纯净水	3.36	0.33	0.997 7	6.79	0.23	0.940 2	24.33	0.79	0.997 8
钠吸附比为 30, $C = 80 \text{ mmol/L}$	2.54	0.32	0.988 3	5.89	0.22	0.952 7	11.29	0.70	0.996 5
钠吸附比为 30, $C = 20 \text{ mmol/L}$	2.77	0.32	0.991 5	5.25	0.22	0.902 8	6.60	0.78	0.974 9
钠吸附比为 30, $C = 2 \text{ mmol/L}$	1.81	0.39	0.996 4	5.25	0.21	0.947 2	5.37	0.87	0.997 9
钠吸附比为 20, $C = 80 \text{ mmol/L}$	3.37	0.39	0.993 6	6.30	0.32	0.970	32.78	0.83	0.999 8
钠吸附比为 20, $C = 20 \text{ mmol/L}$	3.35	0.33	0.998 5	6.41	0.24	0.953 5	20.60	0.78	0.990 2
钠吸附比为 20, $C = 2 \text{ mmol/L}$	3.58	0.34	0.998 1	6.13	0.28	0.973 3	26.75	0.72	0.992 7
钠吸附比为 10, $C = 80 \text{ mmol/L}$	3.97	0.38	0.993 8	6.90	0.31	0.973 3	42.26	0.75	0.998 0
钠吸附比为 10, $C = 20 \text{ mmol/L}$	3.17	0.38	0.995 3	6.26	0.29	0.927 7	32.26	0.77	0.999 2
钠吸附比为 10, $C = 2 \text{ mmol/L}$	3.96	0.35	0.998 5	6.30	0.29	0.977 7	40.17	0.74	0.998 4

由表 2 可以看出,用幂函数来表达 X 、 Z 随时间的变化规律,其相关系数很高。参数 a 和 b 均大于零,说明该幂函数为增函数,即 X 、 Z 随着时间的增加而增加。对时间 t 进行求导,即得到不同时刻湿润锋水平和垂直运移速度 $V_x = ab/t^{1-b}$ 或 $V_z = ab/t^{1-b}$,该式表明当吸水时间趋于无穷时湿润锋前进速度趋于零。本次试验均是在湿润锋几乎停止前进时结束的,所以试验结束时的水平和垂直距离可以认为是该处理所能达到的最大极限,该数据为咸水负压灌溉时灌水器间距的确定和作物种类的选择提供了依据。

当灌溉水的钠吸附比一定时,相同时间湿润锋的最大水平湿润距离和最大垂直湿润距离随灌溉水盐分浓度的增加而增加。这是因为土壤水的溶质势 ψ_s 与其中的灌溉水盐分浓度 C 成反比^[16],盐分浓度越大,溶质势越小,则溶质吸力越大,因此较大的浓度 C 有利于增加湿润体的运移速度。当钠吸附比等于 30 且灌水时间相同时,3 种灌溉水盐分浓度时的 X 和 Z 变幅不大,浓度 C 对湿润体运移的影响可以忽略。与纯净水相比,钠吸附比等于 30 时,3 种浓度处理时的 X 和 Z 均有减小(图 3a 和图 4a);当钠吸附比等于 10 时,3 种浓度处理时的 X 、 Z 与纯净水灌溉相比均有增加(图 3c 和图 4c)。

当 C 一定时, X 和 Z 均随着钠吸附比的增加而减小(图 3、4),这说明,在用咸水进行负压灌溉时,不仅要考虑灌溉水的盐分浓度,灌溉水的钠吸附比,即溶质中各离子的比例对湿润体运移的影响也是不

可忽略的。钠吸附比越大,表明灌溉水中钠离子的比例越高,而钠离子容易造成土壤的弥散,因此不利于湿润体的运移。而当钠吸附比一定时,灌溉水中较高盐分含量可以提高土壤导水率,但可能对土壤造成次生盐碱化的威胁,而灌溉水盐分含量太低可能引起土壤粘粒分散,导致土壤导水率降低^[10]。

2.2 土壤水分入渗

累积入渗量是描述入渗特征的常用指标。为对比不同水质对负压灌溉湿润体水分入渗的影响,分别绘制了 3 种盐分浓度在一定的钠吸附比条件下累积入渗量 I 随时间 t 的变化曲线(图 5a、5b、5c),以及 3 种钠吸附比在一定浓度 C 条件下累积入渗量 I 随时间 t 的变化曲线(图 5d、5e、5f)。

不同处理累积入渗量随入渗时间的变化曲线走势基本相同,即累积入渗量随着时间的延长而增加。 I 与 t 之间的关系可以用幂函数来表示,即 $I = at^b$,拟合参数见表 2。从表 2 可以看出,累积入渗量与时间拟合关系中参数 b 较大,因此,相同处理时的水分入渗衰减速度要远小于湿润锋运移的衰减速度。因为在灌溉过程中伴随着蒸发,由于负压灌溉自动吸水的特点,湿润体水分将不断得到补充,使得水分入渗的减小速度较慢。

由图 5 可知,当灌溉水的盐分浓度 C 一定时,相同时间的累积入渗量 I 随着钠吸附比的增加而减小(图 5d、5e、5f)。当灌溉水浓度 $C = 80 \text{ mmol/L}$,灌溉时间为 72 h 时,钠吸附比等于 10 时的累积入渗量为 1 100 mL,为钠吸附比等于 30 时的 4.8 倍。说

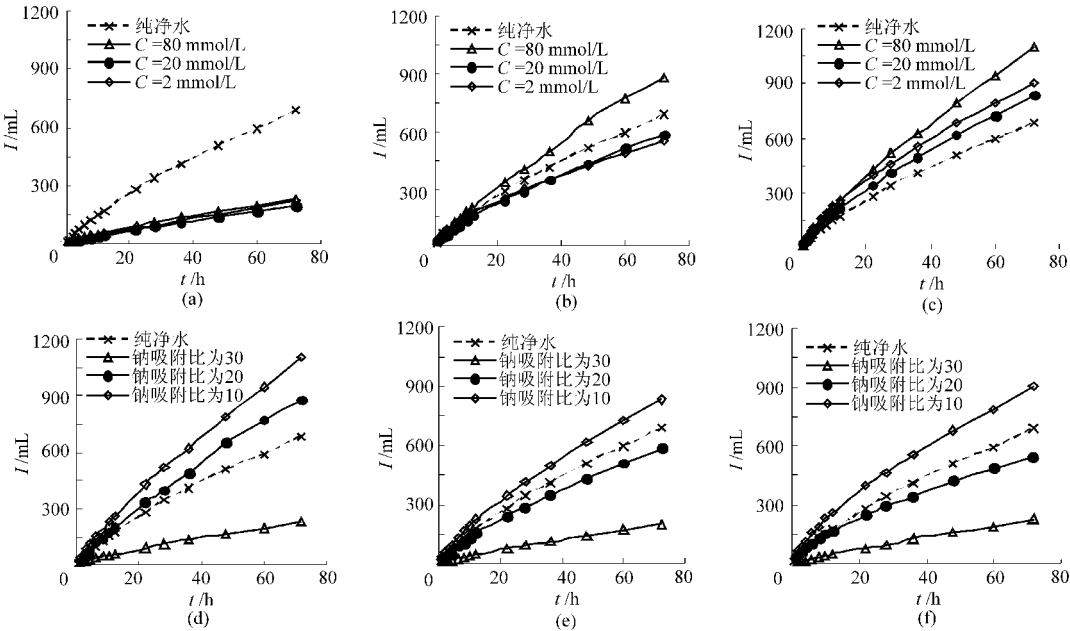


图 5 累积入渗量和时间的关系

Fig. 5 Relationship between cumulative infiltration and time

(a) 钠吸附比为 30 (b) 钠吸附比为 20 (c) 钠吸附比为 10 (d) $C = 80\text{ mmol/L}$ (e) $C = 20\text{ mmol/L}$ (f) $C = 2\text{ mmol/L}$

明灌溉水盐分浓度一定的情况下,较大的灌溉水钠吸附比不利于水分的入渗。当钠吸附比为 20 和 30 时,累积入渗量随着盐分浓度的增加而增加(图 5a、5b)。钠吸附比等于 10 时,3 种浓度处理时的累积入渗量都大于纯净水灌溉时的累积入渗量(图 5c),但表现出灌溉水盐分浓度 $C = 20\text{ mmol/L}$ 时的累积入渗量小于 $C = 2\text{ mmol/L}$ 时的情况,这主要是因为,一方面,随着灌溉水盐分浓度的增加,有利于土壤团聚体的形成,增加土壤水分的入渗,另一方面,由于团聚体的形成,土壤和灌水器的接触面积减小,不利于灌水器的吸水。

为了进一步说明负压灌溉过程中水质对入渗的影响,根据各处理总的入渗时间和累积入渗量,计算其平均入渗率,试验结果见表 3。由表 3 可以看出,钠吸附比一定时,3 种浓度下的平均入渗率变化幅度较小。灌溉水盐分浓度一定时,平均入渗率随着钠吸附比的增加而减小,钠吸附比等于 30 的情况尤其明显。3 种浓度时,钠吸附比等于 30 时的平均入渗率仅为钠吸附比等于 10 时的 1/5 ~ 1/4。由总入渗时间可知,与常规的灌溉方式相比,因为负压灌溉

改变了传统的主动灌水方式,因此利用土壤吸力作用来进行灌水的过程将花费很长的时间^[9],平均入渗率和滴灌中滴头流量相比,仅为普通滴头流量的 1/100 ~ 1/1 000。这一结论为咸水负压灌溉时选择种植作物类型提供了参考依据。

2.3 湿润体内含水率

通过对湿润锋运移规律的分析,各处理试验结束时,湿润体形状近似为一半椭球体。可用描述任意时刻铅直平面内二维湿润锋边界形状的半椭圆形解析式表达,即

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2} = 1$$

将等式两边均乘以 A^2 ,得到

$$x^2 + \left(\frac{A}{B}z\right)^2 = A^2$$

令 $A/B = m$, m 表示湿润体的宽深比。由方程可知,当 $m = 1$ 时,表示湿润体为半球体,本试验结果表明, m 值不等于 1,大致为 0.7 左右,为半椭球体。取 $m = 0.7$,根据实测各取样点的含水率,建立湿润体体积含水率 θ 与 A^2 (即 $x^2 + m^2 z^2$) 之间的关系,用式 $\theta = aA^2 + c$ 表示,拟合结果见表 4。对于不同水质其拟合的决定系数均在 0.88 以上,说明负压灌溉湿润体内含水率的分布近似为一组同心椭球面,土壤含水率随着 A 的增加逐渐减小,但不同处理的减小速度不同,土壤含水率的最大值发生在灌水器附近。各处理土壤含水率的最大值从小到大依次为:钠吸附比为 30 处理、纯净水处理、钠吸附比为 20 处理、钠吸附比为 10 处理。赵伟霞等^[9]在研究

表 3 不同处理的平均入渗率

Tab.3 Average infiltration rate under different treatments

钠吸附比	灌溉水盐分浓度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$			mL/h
	80	20	2	
30	3.18	2.74	3.14	
20	12.16	8.06	7.60	
10	15.42	11.57	12.53	

表 4 土壤含水率 θ 及电导率 k 与椭圆半轴 A 的拟合情况

Tab. 4 Fitting of soil water content θ and electric conductivity k with semi-axis of ellipse A

灌溉水质	θ			k		
	a	c	R^2	a	c	R^2
纯净水	-0.096 0	34.83	0.908 5			
钠吸附比为 30, $C=80$ mmol/L	-0.109 8	31.05	0.891 8	0.007 2	0.775 2	0.714 3
钠吸附比为 30, $C=20$ mmol/L	-0.101 7	32.72	0.883 2	0.007 2	0.574 1	0.794 0
钠吸附比为 30, $C=2$ mmol/L	-0.217 3	30.88	0.965 3	0.012 4	0.620 4	0.776 8
钠吸附比为 20, $C=80$ mmol/L	-0.054 4	37.02	0.954 1	0.000 01	0.967 4	0.797 4
钠吸附比为 20, $C=20$ mmol/L	-0.116 7	35.19	0.879 2	0.000 6	0.747 8	0.783 8
钠吸附比为 20, $C=2$ mmol/L	-0.118 8	37.82	0.928 4	0.000 9	0.699 8	0.741 9
钠吸附比为 10, $C=80$ mmol/L	-0.036 4	37.36	0.932 9	0.000 03	0.923 2	0.720 0
钠吸附比为 10, $C=20$ mmol/L	-0.066 6	36.94	0.906 1	0.000 6	0.708 6	0.719 7
钠吸附比为 10, $C=2$ mmol/L	-0.077 2	39.79	0.924 1	0.000 5	0.662 2	0.723 7

负压灌溉土壤含水率分布时,将湿润体内含水率的分布模拟为一组同心球面。与本试验的结果不尽相同。这说明土壤含水率的分布与湿润锋形状有直接关系。

表 5 显示了不同处理湿润体含水率平均值的变化。因为取样点在取土剖面上基本上均匀分布,所以计算各取样点的算术平均值作为湿润体的含水率平均值。由表 5 可知,钠吸附比一定时,盐分浓度对湿润体平均含水率的影响不大。而钠吸附比的变化对湿润体平均含水率的影响较大,平均含水率随着钠吸附比的增加而减小。除了钠吸附比为 30 的情况,其他处理的湿润体平均含水率均高于纯净水灌溉时的湿润体内平均含水率(22.6%),这说明,只要钠吸附比控制在一定的范围(20 以内),咸水灌溉有利于增加湿润体的平均含水率。

表 5 不同处理湿润体平均含水率

Tab. 5 Average soil water content under different treatments %

钠吸附比	灌溉水盐分浓度/mmol·L ⁻¹		
	80	20	2
30	19.0	20.2	18.7
20	27.1	24.4	23.8
10	29.3	27.4	27.3

2.4 湿润体电导率平均值

土壤中的盐分随水分一起运动,因此,负压灌溉条件下单个灌水器的土壤水分分布必然会对盐分的分布产生影响。根据实测各取样点的电导率,建立湿润体土壤溶液电导率 k 与 $A^2(x^2+m^2z^2)$ 之间的关系,用式 $k=aA^2+c$ 表示,拟合结果见表 4。该拟合的决定系数在 0.7 以上。湿润体的盐分随着 A 的增加而增加,但不同处理的增加速度不同。湿润体内含盐量的分布较含水率的分布均匀。

不同处理湿润体电导率平均值的变化见表 6。

因为取样点在取土剖面上基本上均匀分布,所以计算各取样点的算术平均值作为湿润体的电导率平均值。由表 6 可知,钠吸附比一定时,不同浓度处理对剖面土壤的盐碱度变化影响并不显著。而灌溉水盐分浓度一定时,灌溉水钠吸附比的变化对湿润体土壤溶液电导率的平均值有很大影响。对于 3 种浓度处理,钠吸附比等于 30 时的湿润体电导率平均值为钠吸附比等于 10 时的 1.8 倍。说明用咸水进行负压灌溉时,当灌溉水的钠吸附比大于 20 时,湿润体的电导率平均值急剧增加,而含水率减小,影响和危害作物生长。造成这种结果的主要原因是,较大的灌溉水钠吸附比可能会由于钠离子比例的增加,引起土壤的弥散,使得入渗减小,不利于盐分的淋洗,造成湿润体盐分的整体累积。另外由于灌溉水钠吸附比较高,使得湿润体的平均含水率减小(表 5),不利于盐分的淋洗,也是造成盐分累积的一个原因。

表 6 不同处理湿润体平均电导率

Tab. 6 Average electric conductivity in wetted soil volume under different treatments dS/m

钠吸附比	灌溉水盐分浓度/mmol·L ⁻¹		
	80	20	2
30	1.60	1.46	1.34
20	0.94	0.81	0.81
10	0.89	0.78	0.73

3 结论

(1) 供水水头 $H=-1.5$ m 时,湿润体的最大水平湿润距离、最大垂直湿润距离以及累积入渗量都随着钠吸附比的减小和灌溉水盐分浓度的增加而增加。

(2) 钠吸附比一定时,较大的灌溉水盐分浓度可能有利于湿润体运移,而当灌溉水盐分浓度一定时,较小的钠吸附比有利于湿润体的运移。钠吸附

比等于 30 时,最大水平湿润距离、最大垂直湿润距离以及累积入渗量低于纯净水和其他钠吸附比处理。

(3) 土壤含水率和电导率的分布近似为一组同心椭球面,土壤含水率随着椭球半轴的增加而减小,电导率随着椭球半轴的增加而增加,说明含水率最

大值分布在椭球中心,即灌水器附近,而土壤电导率最大值分布在湿润体边缘,这与点源滴灌湿润体的水盐分布规律相似。

(4) 湿润体的平均含水率随着钠吸附比的增加而减小,湿润体平均电导率随着钠吸附比的增加而增加。

参 考 文 献

1 雷廷武,江培福,Vincent F Bralts,等. 负压自动补给灌溉原理及可行性试验研究[J]. 水利学报,2005,36(3):298~302.
Lei Tingwu, Jiang Peifu, Vincent F Bralts, et al. Principle of negative pressure difference irrigation system and feasibility experimental study[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(3):298~302. (in Chinese)

2 邹朝望,薛绪掌,张仁铎,等. 负水头灌溉原理与装置[J]. 农业工程学报,2007,23(11):17~22.
Zou Chaowang, Xue Xuzhang, Zhang Renduo, et al. Principle and equipment of negative pressure irrigation [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(11):17~22. (in Chinese)

3 邹朝望. 负水头灌溉技术基础研究[D]. 武汉:武汉大学,2007.

4 李邵,薛绪掌,郭文善,等. 负水头灌溉对温室番茄生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(增刊2):225~229.
Li Shao, Xue Xuzhang, Guo Wenshan, et al. Effects of negative pressure irrigation on the growth, yield and quality of tomato in greenhouses[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(Supp. 2):225~229. (in Chinese)

5 杨学军,武菊英,滕文军,等. 负水头亏缺灌溉下 4 种苔草耗水量及抗旱性研究[J]. 草地学报,2011,19(4):607~611.
Yang Xuejun, Wu Juying, Teng Wenjun, et al. Studies on drought resistance and water consumption of four carex species under negative pressure water supply [J]. Acta Agrestia Sinica,2011,19(4):607~611. (in Chinese)

6 江培福,雷廷武,Vincent F Bralts,等. 土壤质地和灌水器材对负压灌溉出水流量及土壤水运移的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(4):19~22.
Jiang Peifu, Lei Tingwu, Vincent F Bralts, et al. Effects of soil textures and emitter material on the soil water movement and efficiency of negatively pressurized irrigation system [J]. Transactions of the CSAE,2006,22(4):19~22. (in Chinese)

7 陈世平,李毅,付秋萍,等. 不同含盐土壤圆盘入渗特征试验[J]. 农业工程学报,2010,26(4):36~41.
Chen Shiping, Li Yi, Fu Qiuping, et al. Experimental of disk infiltration characteristics with different soil salt contents [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(4):36~41. (in Chinese)

8 赵亚楠,肖娟,梁锦陶,等. 供水水头和灌水器对负压灌溉土壤水运移的影响[J]. 灌溉排水学报,2011,30(5):71~74.
Zhao Yanan, Xiao Juan, Liang Jintao, et al. Effects of hydraulic head and emitter on the soil water movement under negative pressure irrigation system [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2011,30(5):71~74. (in Chinese)

9 赵伟霞,蔡焕杰,陈新明,等. 无压灌溉土壤湿润体含水率分布规律与模拟模型研究[J]. 农业工程学报,2007,23(3):7~12.
Zhao Weixia, Cai Huanjie, Chen Xinming, et al. Distribution rule of soil moisture and simulation model in wetting front under non-pressure irrigation [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(3):7~12. (in Chinese)

10 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)

11 Shainberg I, Singer M J. Effect of electrolyte concentration on the hydraulic properties of depositional crust [J]. Soil Science Society of America Journal,1985,49(5):1260~1263.

12 Xiao Zhenhua, Prendergast B, Rengasamy P. Effect of irrigation water quality on hydraulic conductivity [J]. Pedosphere,1992,2(3):237~244.

13 王丹,康跃虎,万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐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)

14 肖娟,雷廷武,李光永. 水质及流量对盐碱土滴灌湿润峰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 Eaton F M. Significance of carbonates in irrigation water [J]. Soil Science,1950,69:123~133.

16 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1999:15~17.