

加氧微咸水溶氧量对土壤水盐运移特征的影响

孙 燕¹ 朱梦杰¹ 王全九^{1,2} 张继红¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 利用微纳米发泡器对微咸水进行加氧处理,并对加氧微咸水入渗条件下的土壤水盐运移特征及对入渗模型参数影响开展了研究。结果表明,在微咸水不同溶氧量入渗条件下,入渗时间相同时,累积入渗量和湿润锋深度随溶氧量增加先增加后减小,微咸水溶氧量为 14.0 mg/L 时累积入渗量和湿润锋深度最大。相比于其他处理,微咸水溶氧量为 14.0 mg/L 时能加快水分入渗,增加土壤体积分含水率。此外,相比于不加氧处理,不同加氧水平入渗均能提高灌溉水脱盐效率。同时,利用现有入渗模型对入渗过程进行了定量分析,结果显示代数模型和 PHILIP 模型都能准确描述加氧微咸水入渗过程,而且模型参数与微咸水溶氧量存在函数关系。PHILIP 模型中吸渗率随着微咸水溶氧量的增加呈先增加后减小的趋势,最大值出现在 14.0 mg/L,代数模型中综合形状系数则呈现相反的规律,最小值出现在 14.0 mg/L,且代数模型可较好描述加氧微咸水一维垂直入渗条件下的土壤含水率分布。

关键词: 加氧微咸水; 溶氧量; 入渗特征; 水盐运移; 入渗模型

中图分类号: S121; S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0299-07

Effect of Dissolved Oxygen Content of Oxygenated Brackish Water on Soil Water and Salt Transport

SUN Yan¹ ZHU Mengjie¹ WANG Quanjiu^{1,2} ZHANG Jihong¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The distribution of salt and water and the parameters of infiltration model under the condition of oxygenated brackish water were investigated, and micro-nanobubble rapid generation device was used to carry out different oxygenated levels treatment to brackish water. The results showed that under the condition of different dissolved oxygen infiltration in brackish water, when the infiltration time was the same, the cumulative infiltration and the wetting front depth were increased first and then decreased with the dissolved oxygen amount, and when the dissolved oxygen content of brackish water was 14.0 mg/L, the cumulative infiltration and the depth of wet front were maximum. Compared with other treatments, infiltration conditions with dissolved oxygen content of 14.0 mg/L in brackish water could accelerate water infiltration and increase soil moisture content. In addition, compared with the treatment without the addition of oxygen, infiltration of different oxygen levels could improve the desalination efficiency of irrigation water. The fitting effect of algebraic model was better than that of PHILIP model under the condition of oxygenated brackish water. In the PHILIP model, with the increase of dissolved oxygen in brackish water, the permeation rate was increased first and then decreased, and the maximum appeared at 14.0 mg/L. In the algebraic model, the comprehensive shape factor showed the opposite law, and the minimum value appeared at 14.0 mg/L, the algebraic model was able to fit the soil moisture content under one-dimensional vertical infiltration conditions of oxygenated brackish water.

Key words: oxygenated brackish water; dissolved oxygen content; infiltration characteristics; water and salt distribution; infiltration model

收稿日期: 2019-03-15 修回日期: 2019-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830754)、国家自然科学基金面上项目(2016A03008)和新疆维吾尔自治区重大科技专项(2016A03008)

作者简介: 孙燕(1990—),女,博士后,主要从事盐碱地改良与植物生理生态研究,E-mail: sunyan199058@126.com

通信作者: 王全九(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与养分运移研究,E-mail: wquanjiu@163.com

0 引言

中国淡水资源匮乏严重制约着农业生产的发展^[1],为了构建节水型社会,维持国家的长治久安,当务之急就是解决淡水资源匮乏的问题^[2]。在拥有丰富微咸水资源的华北、西北旱区开发利用微咸水缓减淡水不足问题就显得极其重要。然而长期利用微咸水灌溉会使作物根区的电导率增加,出现碱化现象^[3-5],土地发生次生盐碱化,成为影响植物生长和微生物活动的主要因素^[6-9]。因此,如何防止土壤次生盐碱化的发生成为开发利用微咸水的重点研究内容。

加氧灌溉技术的可持续且不破坏生态系统的特点使其受到国内外学者的广泛关注。加氧灌溉技术是21世纪初一项通过增加灌溉水中的溶氧量从而提高灌水效率与作物产量的加氧灌溉新技术。朱艳等^[10]通过对加氧淡水灌溉和地下滴灌的对比,揭示了氧气含量与土壤呼吸速率的关系,认为土壤含氧量是影响土壤呼吸速率的重要因子。有研究表明,加氧灌溉改善了土壤压实对土壤的不利影响^[11],而土壤压实则直接影响到土壤水分的传输和储存^[12]。BHATTARAI等^[13]通过曝气水的地下灌溉试验也发现,加氧灌溉能够增大土壤的通气量,改善土壤的通气性。胡继杰等^[14]通过在化学加氧和微纳米气泡加氧灌溉条件下的3种不同品种水稻栽培试验,得出采用加氧淡水灌溉可以改善水稻田的土壤氧化还原状况的结论。利用加氧淡水灌溉还能增加土壤中 N_2O 的排放^[15]以及提高土壤部分酶活性^[16]。此外,有研究表明,加氧灌溉技术改善了盐分对土壤的不利影响^[11],从而创造出良好的根区土壤环境,有利于作物吸收养分,促进作物生长^[17-19]。盐渍土中采用曝气水进行滴灌可以降低盐分对大豆的毒害,提高大豆的耐盐性^[20],加氧微咸水灌溉还能提高番茄的耐盐性^[21],促进番茄生长、提高番茄品质^[22]。谢恒星等^[23]通过温室甜瓜的淡水栽培试验,得出采用2 d 1次的加氧频率处理的地下滴灌方式的综合效益最好。综上所述,加氧灌溉技术对改善盐分胁迫、改善作物根际通气状况、促进作物根系的生长发育以及提高根系对水分和养分的吸收转化能力都具有十分重要的意义,此外,由于淡水资源不足,利用微咸水代替淡水进行加氧灌溉就显得刻不容缓。

然而,加氧微咸水入渗对土壤水盐运移特征影响和如何定量分析其入渗过程仍需进一步研究分析。本文利用微纳米发泡器对微咸水进行不同水平的加氧处理,开展加氧微咸水在盐碱土入渗条件下

的水盐运移及其对入渗模型参数的影响研究,明确加氧微咸水对土壤入渗特征的影响,为微咸水安全高效利用及盐胁迫土壤可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样取自陕西卤泊滩,采集表层0~20 cm土样。土样经风干、碾压,去除杂物过2 mm筛后进行各种指标的测定。采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000型,马尔文仪器有限公司,英国)进行机械组成测定,土样物理性砂粒、黏粒体积分数分别为63.58%、36.42%,根据卡钦斯基土粒分级标准判定为中壤土。试验土壤初始体积含水率为 $0.022\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,饱和体积含水率为 $0.472\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,土壤初始含盐量为 5.48 g/kg 。

供试微咸水由氯化钠试剂(质量分数大于等于99.50%,分析纯AR)和自来水配置而成,矿化度设置为 2 g/L ,自来水溶氧量约为 9.0 mg/L 。试验前对微咸水进行不同水平的加氧处理,分别为不加氧处理和加氧处理,其中不加氧处理为对照(CK),加氧处理微咸水溶氧量分别为11.5、14.0、16.5、19.0 mg/L。加氧处理采用微纳米气泡快速发生装置,加氧过程中采用HQ40型便携式溶氧仪监测微咸水溶氧量变化。

1.2 试验方法

试验于2018年8月在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室进行,采用一维垂直土柱入渗系统开展不同加氧水平(9.0、11.5、14.0、16.5、19.0 mg/L)的微咸水入渗试验,共计5个处理,每个处理设置3次重复,共计15个试验土柱。其中溶氧量 9.0 mg/L 为不加氧处理,作为试验对照(CK)。试验系统包括试验土柱和马氏瓶,试验土柱采用内径5 cm、高45 cm、壁厚5 mm的有机玻璃材质制成,在土柱外壁贴有刻度线(刻度值自上往下逐渐减小),便于试验过程中定量记录湿润锋变化情况。土柱装土高度设置为40 cm,以容重 1.4 g/cm^3 分8层(每层5 cm)装填,并在层与层之间打毛衔接。马氏瓶为土柱提供稳定不变水头,设置高度为50 cm。

试验过程中将水头高度控制在1~2 cm,采用先密后疏原则分别记录前600 min所对应的马氏瓶内水位和土柱内湿润锋高度,600 min时停止供水并立即将土柱内表层水吸出。入渗结束后分层取样,取样深度分别为0~1 cm、5~6 cm、10~15 cm、湿润锋面。采用干燥法($(105\pm2)^\circ\text{C}$)测定土壤质量含水率,通过转换获得土壤体积含水率。采用DDS-

307 型电导仪测定水土质量比为 5:1 的土壤浸提液的电导率,通过计算转换获得土壤含盐量。

1.3 入渗模型

为了分析加氧微咸水溶氧量对现有入渗模型相关参数的影响,分别采用 PHILIP 入渗模型^[24]和代数入渗模型^[25]分析加氧微咸水的入渗特性。

对于均质土壤一维积水垂直入渗,PHILIP 入渗模型的累积入渗量表达式为

$$I = St^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中 I ——累积入渗量,反映土壤水分入渗前期的入渗能力^[26],cm

S ——吸渗率,反映土壤依靠毛管力吸收或者放出水分的能力^[27-28],cm/min^{0.5}

t ——入渗时间,min

因此入渗率公式对应为

$$i = \frac{1}{2} St^{-\frac{1}{2}} \tag{2}$$

式中 i ——入渗率,cm/min

一维垂直积水入渗的代数模型既能很好地描述累积入渗量,还能描述积水入渗后不同土层深度的含水率分布,代数模型具体为

$$I = Z_f(\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \alpha} \tag{3}$$

$$\theta = \left(1 + \frac{Z}{Z_f}\right)^{\alpha} (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \tag{4}$$

式中 Z_f ——湿润锋深度,cm

θ_r ——相对不动水体积含水率,cm³/cm³

α ——非饱和导水率和土壤水分特征曲线综合形状系数

θ ——土壤体积含水率,cm³/cm³

Z ——任意土壤深度,cm

θ_s ——土壤饱和体积含水率,cm³/cm³

2 结果与讨论

2.1 加氧微咸水溶氧量对微咸水入渗特征的影响

图 1 为不同溶氧量加氧微咸水累积入渗量随时间变化过程。由图 1 可知,不同溶氧量微咸水(9.0、11.5、14.0、16.5、19.0 mg/L)累积入渗量随时间增加而增加。在入渗时间相同时,累积入渗量随微咸水溶氧量增加呈先增加后减小变化趋势,微咸水溶氧量为 14.0 mg/L 时土壤累积入渗量最大。溶氧量为 11.5、14.0、16.5 mg/L 的加氧微咸水累积入渗量相比于不加氧处理分别提高 12.64%、18.39%、9.20%,而溶氧量为 19.0 mg/L 的加氧微咸水累积入渗量相比于不加氧处理降低 2.87%。由此可知,微咸水溶氧量为 14.0 mg/L 的加氧微咸水累积入渗

量增加幅度最大。

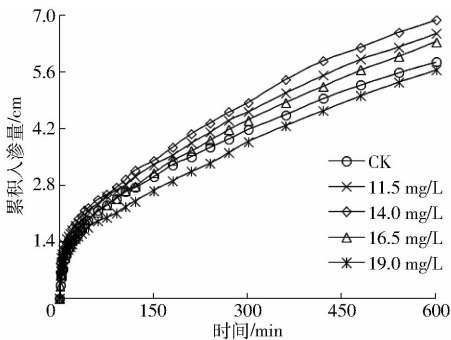


图 1 加氧微咸水入渗对累积入渗量的影响
Fig.1 Effect of oxygenated brackish water infiltration on cumulative infiltration

图 2 为不同溶氧量微咸水入渗下湿润锋深度随时间的变化曲线。由图 2 可知,在微咸水不同溶氧量(9.0、11.5、14.0、16.5、19.0 mg/L)入渗条件下湿润锋深度随时间增加而增加,变化规律与累积入渗量一致。相同入渗时间下,微咸水加氧处理后,湿润锋深度均有不同程度的变化,湿润锋深度随溶氧量增加先增加后减小,微咸水溶氧量为 14.0 mg/L 时湿润锋深度最大,19.0 mg/L 时湿润锋深度最小。溶氧量为 11.5、14.0、16.5 mg/L 的加氧微咸水湿润锋深度相比于不加氧处理分别增加 4.50%、9.00%、4.50%,而溶氧量为 19.0 mg/L 的加氧微咸水湿润锋深度相比于不加氧处理降低 1.84%,微咸水溶氧量为 14.0 mg/L 的加氧微咸水湿润锋深度变化最大。

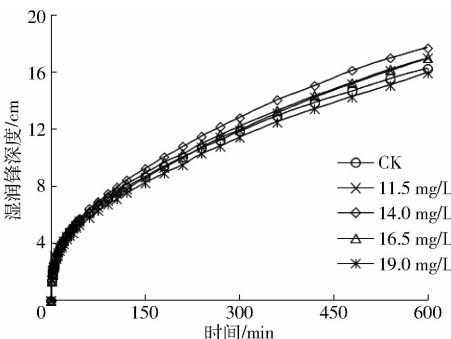


图 2 加氧微咸水入渗对湿润锋运移的影响
Fig.2 Effect of oxygenated brackish water infiltration on wetting front migration

在微咸水溶氧量 9.0、11.5、14.0 mg/L 入渗条件下,入渗时间相同时,累积入渗量和湿润锋深度随溶氧量增加而增加,这是由于随着入渗水溶氧量的增加,增加了湿润体与未湿润土壤之间的氧气浓度差,氧气浓度差在推动氧气扩散的同时,加速了土壤水分的入渗,或者由于微纳米气泡具有较大的比表面积和表面张力的特点^[29],提高了土壤中水分的运动速率,因此累积入渗量和湿润锋深度随溶氧量的增加而增加。在微咸水溶氧量 14.0、16.5、19.0 mg/L

入渗条件下,入渗时间相同时,累积入渗量随溶氧量增加而减少,这是因为尽管氧气浓度差、较大比表面积和表面张力在一定程度上能够加速土壤水分入渗,但是氧气含量增加也加速了氧气气泡间的融合,当溶氧量超过一定程度时,产生大气泡的几率增加^[30],当大气泡对于土壤水分入渗的阻力作用大于氧气浓度差对土壤水分的促进作用时,随着溶氧量的增加累积入渗量和湿润锋深度就会相应减小。

2.2 加氧微咸水溶氧量对土壤水盐分布的影响

在微咸水不同初始溶氧量(9.0、11.5、14.0、16.5、19.0 mg/L)入渗条件下,不同土层深度(0~20 cm)土壤体积含水率的变化如图3所示。由图3可知,土壤含水率随土层深度的增加而减少,表层土壤的含水率最大,由于入渗时间较长,表层土壤含水率均接近饱和体积含水率,土壤底层含水率最小,均接近初始体积含水率。相同入渗时间下,同一土层深度土壤含水率随着溶氧量的增加基本呈先增加后减小的趋势,最大值出现在溶氧量14 mg/L处理,在土壤表层、5、10、15 cm以及湿润锋处,溶氧量为14.0 mg/L处理的土壤含水率分别高于对照7.60%、12.90%、18.00%、20.10%、3.00%。溶氧量为9.0、11.5、14.0、16.5、19.0 mg/L的微咸水入渗湿润体平均含水率分别为0.360、0.380、0.390、0.370、0.350 cm³/cm³,即湿润体平均含水率随着溶氧量的增加呈先增加后减小的趋势,最大值出现在14.0 mg/L,高于对照8.33%,最小值出现在19.0 mg/L,低于对照2.78%。

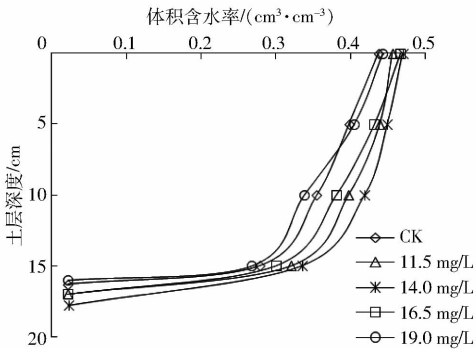


图3 加氧微咸水入渗对土壤含水率的影响

Fig.3 Effect of oxygenated brackish water infiltration on soil moisture content

微咸水溶氧量对土壤含水率分布的影响可能是由于当微咸水溶氧量从对照增加至14.0 mg/L时,进入土壤的微纳米气泡在自身增压破裂时对土壤颗粒产生一定的冲击作用^[31],从而导致土壤总孔隙增大,使得更多水分保存下来,土壤含水率增大。而当微咸水溶氧量由14.0 mg/L进一步增大至19.0 mg/L时,氧气含量的增加使微小气泡融合大气泡的机率增加^[30],大气泡占据了较大的土壤孔隙,减少了土

壤水分所占孔隙,土壤含水率相应减少,有研究表明,相对于不加氧灌溉,加氧灌溉使土壤含氧量增加^[13],降低土壤的体积含水率^[32]。由此可见,在一定的浓度范围内,加氧微咸水入渗能够改善土壤水分分布状况,使更多的水分储存在作物根区,有利于作物生长。

在微咸水不同初始溶氧量(9.0、11.5、14.0、16.5、19.0 mg/L)入渗条件下,不同土层深度含盐量的变化如图4所示。由图4可知,加氧微咸水入渗条件下,含盐量随着土层深度的增加呈逐渐增加趋势。在湿润锋面以上,微咸水加氧处理土壤含盐量基本小于对照组,不同土层深度含盐量随着溶氧量的增加呈先减小后增大的趋势;在湿润锋面处,微咸水加氧处理土壤含盐量均大于对照组,土壤含盐量随着溶氧量的增加呈先增大后减小的趋势。加氧微咸水入渗下的土壤含盐量减去对照组土壤含盐量后与对照组含盐量相比,如比值为负值时定义为相对脱盐率(%),比值为正值时定义为相对积盐率(%)。由于各处理在0~10 cm土层范围内均表现出脱盐效果,因此计算得出0~10 cm土层深度内,在不同微咸水溶氧量入渗条件下,土壤相对脱盐率和相对积盐率的变化(表1)。由表1可知,0~10 cm土层范围内加氧处理微咸水入渗均表现出相对脱盐状态,平均相对脱盐率随着入渗微咸水溶氧量增加分别为-16.4%、-35.4%、-20.1%、-0.2%。由此可见,在一定的浓度范围内,加氧微咸水入渗能提高灌溉水的淋洗脱盐效率,使大量盐分淋洗到土壤底层,有利于作物生长。

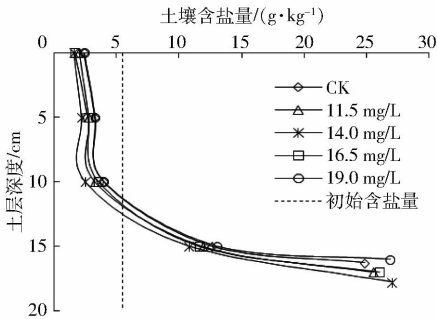


图4 加氧微咸水入渗对土壤含盐量的影响

Fig.4 Effect of oxygenated brackish water infiltration on soil salinity

表1 加氧微咸水入渗对脱盐效果的影响

Tab.1 Effect of oxygenated brackish water infiltration on desalination %

土层深度/ cm	溶氧量/(mg·L ⁻¹)			
	11.5	14.0	16.5	19.0
0	-16.4	-34.6	-31.1	-0.4
5	-15.1	-33.9	-18.6	-0.3
10	-17.7	-37.6	-10.5	0

综上所述,在一定浓度范围内,相比于不加氧处理,加氧微咸水入渗能提高土壤含水率和湿润体平均含水率,改善土壤水分分布状况,使更多水分储存在土壤根区供作物根系利用;能增大土壤的相对脱盐率,使更多盐分淋洗至根区土壤底部,减少盐分对作物根系的胁迫作用,从而创造出有利于作物生长的根区土壤环境。

2.3 加氧微咸水溶氧量对入渗模型参数的影响

分别采用 PHILIP 入渗模型式(1)、(2)和代数入渗模型式(3)、(4)对加氧微咸水入渗实测数据进行处理,获得各入渗模型参数值及决定系数 R^2 ,结果如表 2 所示,其中式(3)是将累积入渗量 I 和湿润锋深度 Z_f 的实测数据进行拟合。通过比较表 2 中 PHILIP 模型和代数模型拟合的决定系数发现,两模型的平均决定系数分别为 0.975、0.991,两入渗模型都可以较好描述加氧微咸水入渗过程。

表 2 入渗模型拟合参数及 R^2

入渗模型		参数	溶氧量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)				
			9.0	11.5	14.0	16.5	19.0
PHILIP	吸渗率 $S/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5})$		0.246	0.274	0.288	0.259	0.229
	决定系数 R^2		0.985	0.958	0.974	0.988	0.970
代数模型	综合形状系数 α		0.273	0.107	0.076	0.33	0.353
	决定系数 R^2		0.996	0.987	0.985	0.993	0.995

吸渗率 S 通常能够反映土壤依靠毛细力吸收水分能力^[27-28],对于 PHILIP 模型,吸渗率 S 随着微咸水溶氧量的增加呈先增加后减小的趋势,表明土壤入渗能力随着微咸水溶氧量的增加先增大后减少,这与累积入渗量及湿润锋的变化规律一致。当微咸水溶氧量为 14.0 mg/L 时,吸渗率 S 最大,高出对照 17.10%;当微咸水溶氧量为 19.0 mg/L 时,吸渗率 S 较小,低于对照 6.90%。将吸渗率与微咸水溶氧量之间的关系采用二次多项式进行拟合,见图 5。拟合结果显示,拟合 R^2 为 0.958,吸渗率 S 与微咸水溶氧量之间呈较好的二次多项式关系,拟合公式为

$$S = -0.002O^2 + 0.049O - 0.047 \quad (5)$$

式中 O ——溶氧量,mg/L

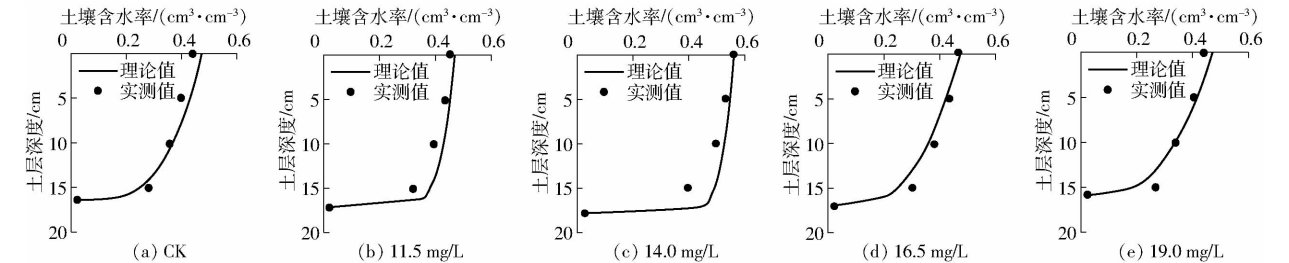


图 7 土壤含水率理论值与实测值

Fig. 7 Theoretical and measured values of soil moisture content

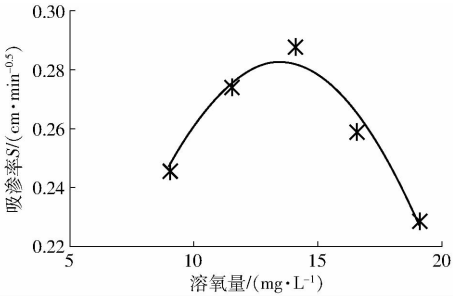


图 5 溶氧量对吸渗率的影响

Fig. 5 Effect of dissolved oxygen content on infiltration rate

对于代数模型,综合形状系数 α 随微咸水溶氧量的增加呈先减小后增大的趋势,当微咸水溶氧量为 14.0 mg/L 时,综合形状系数 α 最小,低于对照 72.20%;当微咸水溶氧量为 19.0 mg/L 时,综合形状系数 α 最大,高于对照 29.30%。将综合形状系数 α 与微咸水溶氧量之间的关系采用二次多项式进行拟合,见图 6。拟合 R^2 为 0.700,拟合结果显示,综合形状系数 α 与微咸水溶氧量之间呈较好的二次多项式关系,拟合公式为

$$\alpha = 0.008O^2 - 0.197O + 1.406 \quad (6)$$

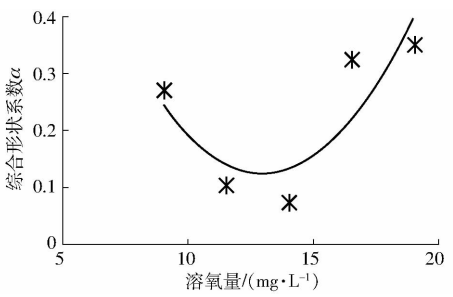


图 6 溶氧量对综合形状系数的影响

Fig. 6 Effect of dissolved oxygen content on overall shape factor

2.4 代数模型描述加氧微咸水入渗下的土壤含水率剖面准确性分析

将拟合得到的综合形状系数 α 代入式(4)可以计算土壤含水率,计算土壤含水率和实测值之间的关系见图 7。由图可以看出,含水率剖面计算值与实测值比较吻合。为了更好地说明代数模型的计算效果,对土壤含水率计算值和实测值之间进行误差分析。结果显示,随着溶解氧的增大,各处理

的平均绝对误差分别为 2.20%、1.90%、2.00%、0.80%、2.30%，由此可见，代数模型能够较为准确计算加氧微咸水一维垂直入渗条件下的土壤含水率。

3 结 论

(1)在微咸水不同溶氧量入渗条件下，入渗时间相同时，累积入渗量和湿润锋深度随溶氧量增加先增加后减小，微咸水溶氧量为 14.0 mg/L 时累积入渗量和湿润锋深度最大。

(2)相同入渗时间下，同一土层深度土壤含水

率随着溶氧量的增加基本呈先增加后减小的趋势，最大值出现在溶氧量 14.0 mg/L 处理。此外，相比于不加氧处理，微咸水加氧处理入渗条件下均能提高灌溉水淋洗脱盐效率。

(3)加氧微咸水入渗条件下代数模型和 PHILIP 模型都能较好描述土壤入渗过程。PHILIP 模型中吸渗率 S 随着微咸水溶氧量的增加呈先增加后减小的趋势，最大值出现在 14.0 mg/L，代数入渗模型中综合形状系数 α 则呈现相反的规律，最小值出现在 14.0 mg/L，且代数模型能够拟合加氧微咸水一维垂直入渗条件下的土壤含水率。

参 考 文 献

[1] 王全九, 许紫月, 单鱼洋, 等. 去电子处理微咸水矿化度对土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 125–132.
WANG Quanjiu, XU Ziyue, SHAN Yuyang, et al. Effect of salinity of de-electronic brackish water on characteristics of water and salt movement in soil[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 125–132. (in Chinese)

[2] 金宏智, 严海军, 钱一超. 国外节水灌溉工程技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 59–63.
JIN Hongzhi, YAN Haijun, QIAN Yichao. Overseas development of water-saving irrigation engineering technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 59–63. (in Chinese)

[3] 马文军, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 73–80.
MA Wenjun, CHENG Qinjuan, LI Liangtao, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 73–80. (in Chinese)

[4] 王诗景, 黄冠华, 杨建国, 等. 微咸水灌溉对土壤水盐动态与春小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 27–33.
WANG Shijing, HUANG Guanhua, YANG Jianguo, et al. Effect of irrigation with saline water on water-salt dynamic and spring wheat yield[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 27–33. (in Chinese)

[5] 谭军利, 康跃虎, 窦超银. 干旱区盐碱地覆膜滴灌不同年限对糯玉米生长和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(23): 4957–4967.
TAN Junli, KANG Yaohu, DOU Chaoyin. Effects of different irrigation and cropping years on waxy corn growth and yield using drip irrigation with plastic-film mulching on saline-sodic soils in arid area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(23): 4957–4967. (in Chinese)

[6] 邱让建, 刘春伟, 徐金勤, 等. 灌溉水含盐量对辣椒产量品质及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 75–80.
QIU Rangjian, LIU Chunwei, XU Jinqin, et al. Effect of irrigation water salinity on yield, quality and water use efficiency of hot pepper[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 75–80. (in Chinese)

[7] PEREZ-PEREZ J G, ROBLES J M, GARCIA-SANCHEZ F, et al. Comparison of deficit and saline irrigation strategies to confront water restriction in lemon trees grown in semi-arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2016, 164: 46–57.

[8] CAO Y N, TIAN Y Q, GAO L H, et al. Attenuating the negative effects of irrigation with saline water on cucumber (*Cucumis sativus* L.) by application of straw biological-reactor[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 169–179.

[9] GHOLLARATA M, RAIESI F. The adverse effects of soil salinization on the growth of *Trifolium alexandrinum* L. and associated microbial and biochemical properties in a soil from Iran[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(7): 1699–1702.

[10] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 223–232.
ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Effects of climatic factors and soil parameters on soil respiration under oxygation conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 223–232. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161227&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.027. (in Chinese)

[11] BHATTARAI S P, SU N, MIDMORE D J. Oxygation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments[J]. Advances in Agronomy, 2005, 88: 313–377.

[12] NWAAZ M F, BOURRIE G, TROLARD F. Soil compaction impact and modelling. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 33(2): 291–309.

[13] BHATTARAI S P, PENDERGAST L, MIDMORE D J. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils [J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 108(3): 278 – 288.

[14] 胡继杰, 朱练峰, 胡志华, 等. 土壤加气方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 167 – 174.
HU Jijie, ZHU Lianfeng, HU Zhihua, et al. Effects of soil aeration methods on soil nitrogen transformation, rice nitrogen utilization and yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(1): 167 – 174. (in Chinese)

[15] 陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N₂O 排放特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 111 – 117.
CHEN Hui, HOU Huijing, CAI Huanjie, et al. Soil N₂O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(3): 111 – 117. (in Chinese)

[16] LI Y, NIU W Q, WANG J W, et al. Effects of artificial soil aeration volume and frequency on soil enzyme activity and microbial abundance when cultivating greenhouse tomato[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(5): 1208 – 1221.

[17] ITYEL E, BEN-GAL A, SILBERBUSH M, et al. Increased root zone oxygen by a capillary barrier is beneficial to bell pepper irrigated with brackish water in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131: 108 – 114.

[18] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 163 – 172.
ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Oxygation improving soil aeration around tomato root zone in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(21): 163 – 172. (in Chinese)

[19] PENDERGAST L, BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a Vertosol [J]. *Crop & Pasture Science*, 2013, 64(12): 1171 – 1181.

[20] BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Oxygation enhances growth, gas exchange and salt tolerance of vegetable soybean and cotton in a saline vertisol [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(7): 675 – 688.

[21] 翟红梅, 冯俊霞, 韩伟, 等. 微咸水富氧灌溉对番茄生长、品质及土壤微生物的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(12): 85 – 88.

[22] 张庆龙, 徐飞鹏, 贾瑞卿, 等. 滨海盐碱区日光温室番茄施肥与加氧灌溉模式[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(1): 51 – 55.
ZHANG Qinglong, XU Feipeng, JIA Ruiqing, et al. Fertigation and oxygenation on Chinese solar greenhouse tomato in coastal salt-alkali region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(1): 51 – 55. (in Chinese)

[23] 谢恒星, 蔡焕杰, 张振华. 温室甜瓜加氧灌溉综合效益评价[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11): 79 – 83.
XIE Hengxing, CAI Huanjie, ZHANG Zhenhua. Valuation of comprehensive benefit in greenhouse muskmelon under aeration irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 79 – 83. (in Chinese)

[24] PHILIP J R. The theory of infiltration: 1. the infiltration equation and its solution[J]. *Soil Science*, 1957, 83(5): 345 – 357.

[25] WANG Q, HORTON R, SHAO M. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution [J]. *Soil Science*, 2003, 168(10): 671 – 676.

[26] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 40 – 45.
LI Zhuo, WU Pute, FENG Hao, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6): 40 – 45. (in Chinese)

[27] 付秋萍, 王全九, 樊军. 盘式吸渗仪吸渗率计算方法比较[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(9): 56 – 62.
FU Qiuping, WANG Quanjiu, FAN Jun. Comparison among permeability methods of disc infiltrometer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(9): 56 – 62. (in Chinese)

[28] 付秋萍, 王全九, 樊军. Philip 公式确定吸渗率时间尺度研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4): 65 – 70.
FU Qiuping, WANG Quanjiu, FAN Jun. Study on the time scales of soil sorptivity determined by Philip equation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4): 65 – 70. (in Chinese)

[29] 魏婕, 蒋毓婷, 李军, 等. 微纳米气泡特征及其在环境治理中的应用[J]. *环境工程*, 2018, 36(10): 75 – 79.
WEI Jie, JIANG Yuting, LI Jun, et al. Characteristics of micro-nano bubble and its application in environmental treatment [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(10): 75 – 79. (in Chinese)

[30] 王云创, 李光仲, 李向民. 气泡对管中流动液体产生阻力的分析[J]. *物理通报*, 2003(10): 13 – 14.

[31] AGARWAL A, NG W J, LIU Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment [J]. *Chemosphere*, 2011, 84(9): 1175 – 1180.

[32] 朱艳. 加气灌溉的番茄根区土壤环境和产量效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.