

DOI: 10.11766/trxb201809110457

土壤表面电场对黄土母质发育土壤水分入渗特性的影响及模拟*

杨志花^{1, 3} 胡斐南^{1, 2} 刘婧芳² 许晨阳² 马任甜² 王子龙² 赵世伟^{1, 2†}

(1 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)

(2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 水资源短缺是黄土高原地区农业生产和生态环境建设主要的限制因子。土壤水分入渗过程不仅决定着土壤对雨水和灌溉水等有限水源的利用程度, 而且也深刻影响着地表径流和土壤侵蚀强度。土壤表面电场对团聚体稳定性具有重要影响, 团聚体破碎后土壤孔隙将发生重要变化, 并影响水分入渗过程。然而, 目前关于土壤电场作用对黄土母质发育土壤水分入渗过程的影响尚不清楚, 同时考虑表面电场作用后经典土壤水分入渗模型的适用性还有待进一步验证。因此, 本研究采用室内一维定水头土柱模拟试验, 通过定量调控土壤表面电场, 研究了不同土壤电场强度对水分入渗速率、湿润锋运移、累积入渗量的影响, 并采用 Kostiakov 模型和 Philip 模型对土壤水分入渗过程进行拟合。结果表明: (1) 湿润锋运移速度、入渗速率和累积入渗量均随入渗电解质浓度的减小、表面电位(绝对值)和电场的增大而降低, 这表明土壤表面电场对土壤水分入渗具有重要的、不可忽略的影响。(2) 当电解质浓度 $< 0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 壤土和褐土的电位绝对值大于 233 mV 和 223 mV 时, 土壤水分入渗特性参数随时间的变化曲线较为接近, 表明 233 mV 和 223 mV 分别是影响两种土壤水分入渗过程的临界电位值。(3) Kostiakov 模型和 Philip 模型对于壤土和褐土入渗过程的模拟均有较好的适用性, 但通过进一步分析其拟合统计特征值(决定系数 R^2 、残差平方和、均方根误差 RMSE 值), 发现 Kostiakov 模型的拟合结果更优。该研究结果可为黄土高原土壤水分入渗的内部调控新技术提供理论参考。

关键词 土壤表面电场; 湿润锋; 入渗速率; 累积入渗量; 入渗模型

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

土壤水分入渗是地表水转化为土壤水的一个重要过程, 它不仅决定着地表径流量的产生进而影响土壤侵蚀状况, 而且也决定着灌溉水的利用效率进而影响作物产量^[1-2]。因此, 研究土壤水分入渗变化规律及机制, 对合理利用和调节土壤水库功能, 增强土壤水分保蓄能力, 减少土壤侵蚀, 提高作物产

量具有重要的科学价值和实践意义^[3]。

土壤水分入渗主要受土壤有机质含量、容重、质地、结构稳定性、土壤温度及水质等因素的影响。其中结构稳定性对土壤水分入渗的影响至关重要。团聚体作为一种良好的土壤结构体, 其破碎后会释放大量的细颗粒物质, 堵塞土壤孔隙, 降低土壤入渗

* 国家自然科学基金项目(41601236, 41701261)、中国科学院西部之光项目(XAB2016B07)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.41601236, 41701261) and the "Light of West China" Program from the Chinese Academy of Sciences (No.XAB2016B07)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: swzhao@nwfufu.edu.cn

作者简介: 杨志花(1991—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤水分运动方面研究。E-mail: 15838583416@163.com

收稿日期: 2018-09-11; 收到修改稿日期: 2019-03-17; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-04-29

能力^[4]。土壤孔隙是水分入渗过程的主要通道，孔隙的大小和分布决定着水分入渗的快慢。对于某一特定土壤，水分入渗过程中土壤孔隙状况受土壤结构稳定性的强烈影响。因此，良好的土壤结构稳定性对土壤水分保蓄具有重要意义。新近的研究发现：介观尺度土壤内力作用（静电斥力，水合斥力和范德华力）所产生的压强可高达数百个大气压，是团聚体破碎的主要推动力^[5-7]，进而对土壤水分入渗过程带来影响。土壤内力作用受到土壤溶液电解质浓度和类型的影响。吴忠东和王全九^[8]通过研究入渗水矿化度对土壤入渗特征的影响，发现在一定浓度范围内，随 Na^+ 溶液浓度的升高，土壤的渗透性增强。郭太龙等^[9]研究发现随着入渗水的矿化度的增加，土壤的入渗能力增加。通过定量调控土壤表面电场强度，Yu 等^[10]研究发现，随着本体溶液电解质浓度的降低，紫色土土壤表面电场的增强，土壤水分入渗速率减小。可见，土壤表面电场将会深刻地影响水分入渗过程。

黄土高原是全世界水土流失最为严重的地区之一，降雨较少且集中。提高该区有限水的利用效率对维系区域生态环境安全和绿色农业高效发展具有重要的意义。降雨或灌溉水进入土壤后，首先使得土壤本体溶液电解质浓度降低，土壤表面电场增强，团聚体稳定性降低，并最终影响水分入渗过程。尽

管有关黄土区水分入渗、有效性及其影响因素的研究较多^[11-12]，但是关于该区土壤水分入渗过程中土壤界面性质（土壤颗粒表面电场、电位）变化及其对入渗特性的影响尚不清楚，同时考虑土壤表面电场作用后经典水分入渗模型的适用性还有待进一步验证。

因此，本研究以两种典型的黄土母质发育土壤—壤土和褐土为研究对象，通过理论计算与试验验证相结合的方法，旨在探究土壤表面电场对水分入渗的影响，并采用经典水分入渗模型进行拟合。研究结果可为黄土高原土壤水分入渗的内部调控新技术提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以壤土和褐土为供试土壤，分别采自陕西杨凌和周至的农田表层土壤（0~20 cm），去杂风干后过 1 mm 筛装袋备用。供试土壤的基本性质列于表 1，其中土壤有机质采用重铬酸钾外加热容量法测定，pH 采用电极法（土水比：1 : 2.5）测定，阳离子交换量（CEC）和比表面积（SSA）采用物质表面性质联合测定法测定^[13-14]，土壤颗粒组成采用 MS2000 激光颗粒分析仪（马尔文公司，英国）测定。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soils tested

土壤类型 Soil type	有机质		阳离子交换量	比表面积	黏粒	粉粒	砂粒
	SOM/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH	CEC / $(\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1})$	SSA / $(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	Clay /%	Silt /%	Sand /%
					< 0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm
壤土 Lou soil	14.48	8.01	23.19	41.53	25.40	40.55	34.05
褐土 Cinnamon soil	24.11	7.90	19.64	42.29	27.96	44.86	27.18

1.2 样品制备

为定量表征土壤电场对土壤水分入渗特性的影响，首先需要土壤样品进行表面处理，制备成单一离子饱和样品，以排除其他杂质离子的干扰^[5]。由于 Na^+ 在土壤颗粒表面较弱的极化能力，本研究中使用 Na^+ 饱和样品^[10,15]。 Na^+ 饱和样品的制备过程

如下^[6,16]：首先，称取 1.5 kg 风干土壤样品，置于 5 000 mL 大烧杯中，加入 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液定容至 5 000 mL，搅拌 12 h 后离心（4 500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，5 min），弃去上清液，重复上述操作 3 次；之后，将 NaCl 溶液换为去离子水，重复上述步骤，洗去溶液中多余盐分。最后将饱和样品在 65°C 下烘干，研

磨过 1 mm 筛备用。

1.3 试验装置与方法

本试验装置为一组自制的有机玻璃柱^[10]，由底座、长方体装土槽和加液槽 3 部分构成。底座为长 20 cm、宽 15 cm、厚 3 cm 的长方体有机玻璃板。长方体装土槽内腔长、宽、高分别为 3 cm、1 cm 和 20 cm，底端以带有 2 mm 的小孔隔板隔开，以保证装置内土壤的通气性。上部加液槽高 5 cm，用于加入入渗溶液。长方体装土槽和加液槽之间以带有直径 2 mm 小孔的隔板隔开，隔板上方放置数颗小玻璃珠，以减少液体注入时对表面土壤的冲击。

本研究采用一维定水头垂直积水入渗法测定入渗特性。参照实际土壤容重和入渗装置的体积，将试验土壤容重设置为 $1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，装样时每 2 cm 分层填装^[10,17-18]，层间打毛。土柱底部铺垫铁丝网和滤纸，防止土粒漏失。填装好后，用带有刻度的有机玻璃盖板盖好，侧方涂抹凡士林密封。入渗过程中采用先密后疏原则依次记录湿润锋运移位置变化及对应入渗时间。入渗试验结束后，快速取下盖板，每隔 0.5 cm 取出各段土体，分别称量烘干前后的土体质量，计算土壤含水率、土壤累积入渗量及水分入渗速率^[17,19-21]。

本研究中，土壤表面电场通过本体溶液电解质浓度来定量调控。根据经典双电层理论，采用一系列不同浓度的 NaCl 溶液作为入渗溶液来调节土壤电场。为了对比分析土壤电场作用对水分入渗的影响，使土壤电场在一个较宽的范围内变化，试验中将 NaCl 溶液浓度梯度设置为 1、0.1、0.01、0.001 和 $0.0001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.4 数据计算与分析

根据双电层理论，在 1:1 型电解质溶液中，土壤表面电位可由下式来计算^[22]：

$$\varphi_0 = -\frac{2RT}{ZF} \ln\left(\frac{1-a}{1+a}\right) \quad (1)$$

$$\frac{\kappa C}{SC_0} = 1 + \frac{4}{1+a} - \frac{4}{1+e^{-1}a} \quad (2)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{8\pi F^2 Z^2 C_0}{\varepsilon RT}} \quad (3)$$

式中， φ_0 表示土壤表面电位，V； Z 表示电解质阳离

子的化合价； R 表示气体常数， $8.31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ； T 表示绝对温度，298 K； F 表示法拉第常数， $96485.34 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ ； a 表示方程中间变量； κ 表示德拜-休克尔系数， $1\cdot\text{dm}^{-1}$ ； C 表示阳离子交换量， $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ； C_0 表示本体溶液中阳离子的平衡浓度， $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ； S 表示比表面积， $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ； ε 表示介电常数， $8.9\times 10^{-10} \text{ C}^2\cdot\text{J}^{-1}\cdot\text{dm}^{-1}$ 。

距离土壤颗粒表面 x 处的电位和场强计算公式如下：

$$\varphi_{(x)} = \frac{4RT}{F} \tanh^{-1}(be^{-\kappa x}) \quad (4)$$

$$b = \tanh(F\varphi_0/4RT) \quad (5)$$

$$E_{(x)} = -\sqrt{\frac{8\pi RT}{\varepsilon} \left[C_0 \left(e^{\frac{ZF\varphi_{(x)}}{RT}} - 1 \right) \right]} \quad (6)$$

式中， $\varphi_{(x)}$ 表示距离颗粒表面 x 处的电位，V； x 表示双电层中距离颗粒表面的距离，nm； b 表示中间变量； $E_{(x)}$ 表示距离表面 x 处的电场强度， $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

对于匀质土壤适用的入渗模型有 Kostiakov 模型^[23]和 Philip 模型^[24]，其公式分别如式(7)、式(8)所示：

$$I = Kt^A \quad (7)$$

$$I = St^{0.5} \quad (8)$$

式中， t 为入渗时间，min； I 为累积入渗量，cm（本研究以 g 来表示）； A ， K 皆为拟合得到的经验常数， A 反映土壤入渗能力的衰减速度^[25]， K 为入渗开始后某种意义上的第一个单位时段末的累积入渗量，在数值上等于第一单位时段末的入渗速度； S 为吸渗率， $\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ ，指土壤依靠毛管力吸收和释放液体的能力，反映土壤前期入渗能力^[26-27]。

本研究采用 Excel 2003 进行数据处理，Origin 9.1 进行软件作图和土壤入渗模型拟合，SPSS 21.0 软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 表面电化性质

根据双电层理论，本体溶液电解质浓度的变

化将影响土壤表面电位和颗粒周围的电场。根据测定的比表面积和阳离子交换量,不同电解质浓度下土壤表面电位可通过式(1)~式(3)定量计算,结果如表2所示。由表2可知,在两种土壤中,随着本体溶液电解质浓度的降低,土壤表面电位绝对值增大。例如,在高电解质浓度 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,壤土和褐土的表面电位分别为 -121.00 mV 和 -112.25 mV ;当电解质浓度降低至 $0.0001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,壤土和褐土的表面电位高达 -349.99 mV 和 -340.56 mV 。电解质浓度从 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低至 $0.0001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,两种土壤的表面电位绝对值增长了 1.89 倍、2.03 倍。

依次将一系列的表面电位数代入式(4)~式(6)中,得到不同电解质浓度下的土壤颗粒周围电场分布曲线,如图1所示。从图中可以看出,随着距离的增大,电场强度不同程度的减小。各电解质浓度下,土壤颗粒表面处的电场强度皆高达 $10^8 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。在两种土壤中,随着电解质溶液浓度的增加,土壤颗粒周围相同距离处的电场强度减小,表面电场的作用距离急剧缩短。例如,当电解质浓度为 $0.001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,电场作用距离达 140 nm 以上;但当电解质浓度为 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,电场作用距离压缩至 15 nm 以下。这表明,通过改变本体溶液电解质浓度即可调控土壤颗粒周围电场强度与分布。

表 2 不同电解质浓度下的土壤表面电位

Table 2 Soil surface potential relative to electrolyte concentration

电解质浓度 Electrolyte concentration / ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	表面电位 Surface potential / mV	
	壤土 Lou soil	褐土 Cinnamon soil
1	-121.00	-112.25
0.1	-175.21	-166.24
0.01	-232.55	-223.27
0.001	-291.06	-281.67
0.0001	-349.99	-340.56

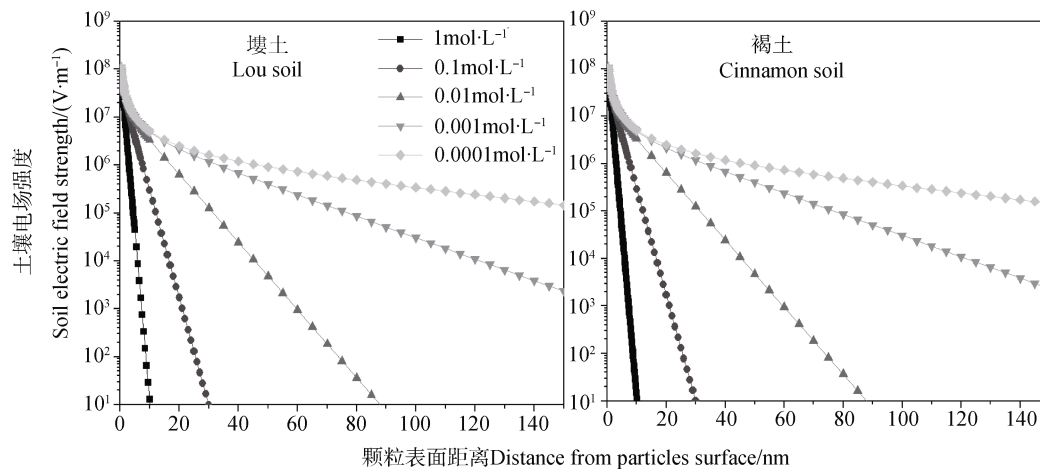


图 1 不同电解质浓度下土粒周围电场强度分布

Fig. 1 Distribution of soil electric field strength around soil particles relative to concentration of electrolyte

2.2 土壤电场对黄土水分入渗特性的影响

2.2.1 湿润锋运移位置的变化 湿润锋是指水分下渗过程中湿润层下缘明显的干湿交界锋面,其运移速度的大小可反应土壤的输水能力^[28]。湿润锋位置的变化可直观地反映土壤水的垂向运动特征。图

2 给出了不同电解质浓度条件下湿润锋运移位置的变化情况。从图中可以看出,电解质浓度对湿润锋的运移速度具有重要影响。随着电解质浓度增大,湿润锋运移速度加快。例如,当测定时间为 300 min ,电解质浓度为 $0.0001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,壤土和褐土的湿

润锋运移位置分别为 2.05 cm 和 2.15 cm；但当对应的浓度为 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，运移位置分别为 8.51 cm 和 6.08 cm。此外，当电解质浓度低于 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后，不同浓度条件下湿润锋运移速度较为缓慢且接近。例如，以壤土为例，当测定时间为 300 min 时，土壤本体溶液电解质浓度为 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，壤土中湿润锋的运移位置为 2.84 cm；而当对应的电解质浓

度分别为 $0.001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.0001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，湿润锋的运移位置分别为 2.08 cm、2.05 cm。同时，当溶液浓度小于 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后，湿润锋运移位置几乎不再随入渗历时的变化而发生改变。这表明 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 是土壤水分入渗过程的临界浓度。该条件下湿润锋运移速度非常缓慢，说明此时的土壤水分运动受到土壤电场的极大限制。

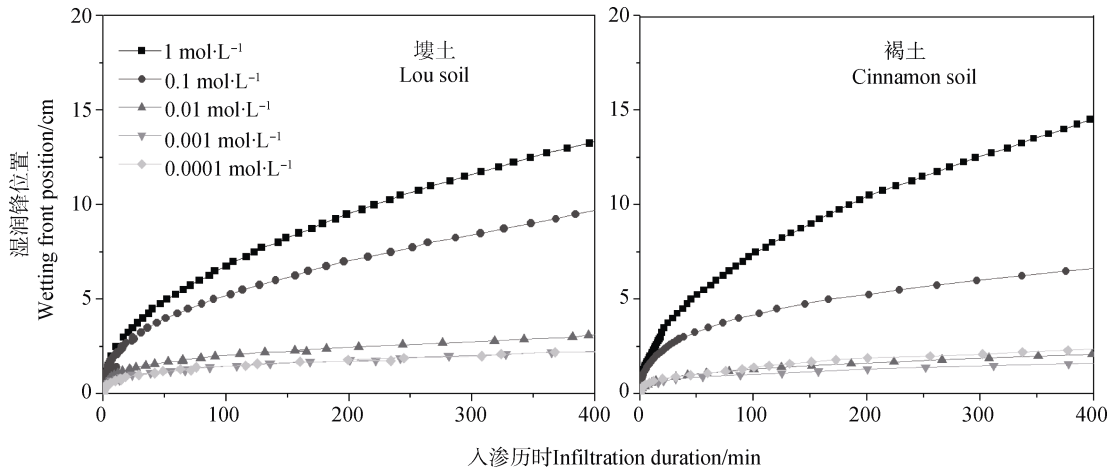


图 2 不同电解质浓度下湿润锋位置的动态变化

Fig. 2 Dynamics of wetting front position relative to concentration of electrolyte

2.2.2 累积入渗量的变化 土壤水分累积入渗量是指单位面积流入土壤的水分量，是土壤水分运动的主要特征之一。图 3 给出了各电解质浓度下累积入渗量随着测定时间的变化情况。从图中可以看出，电解质浓度对水分累积入渗量具有重要影响。当浓度较高时，累积入渗量随着入渗时间的延长而增加，曲线斜率由陡逐渐变缓；而当浓度较低时 ($< 0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)，累积入渗量变化曲线较为接近。例如，当测定时间为 300 min，电解质浓度为 $0.001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，壤土和褐土的累积入渗量分别为 2.04 g 和 1.62 g；但当电解质浓度升高至 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，壤土两浓度下的累积入渗量分别为 3.59 g 和 10.69 g，与 $0.001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的累积入渗量相比，增加幅度分别为 75.98% 和 424.02%；褐土两浓度下的累积入渗量分别为 2.22 g、7.54 g，增加幅度分别为 37.04%、365.43%。这表明土壤电场对累积入渗量的影响十分明显。电解质浓度 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 是影响累积入渗量的临界点。对比图 2，累积入渗量和湿润锋随

时间变化的趋势基本一致。

2.2.3 入渗速率的变化 入渗速率是指单位时间通过地表单位面积入渗至土壤中的水量^[29]。图 4 为壤土和褐土在不同电解质浓度下入渗速率随时间的变化情况。由图 4 可知，不同电解质浓度条件下的入渗速率随时间的变化趋势相同：在入渗初始阶段 (30 min 内)，各浓度下入渗速率皆急剧减小；在入渗稳定前阶段 (30~250 min)，随电解质浓度的降低，电场的增强，入渗速率皆缓慢减小；在入渗稳定阶段 (250~400 min)，入渗速率逐渐趋于稳定，该稳定值即土壤的稳定入渗速率。在壤土中，30 min 时， $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.0001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 下的入渗速率分别为 $0.060 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.014 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，稳定入渗速率分别为 $0.010 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.002 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。而在褐土中，30 min 的入渗速率分别为 $0.057 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.009 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，最后稳定在 $0.017 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.003 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。这表明水分入渗速率强烈地受到土壤表面电场的影响。

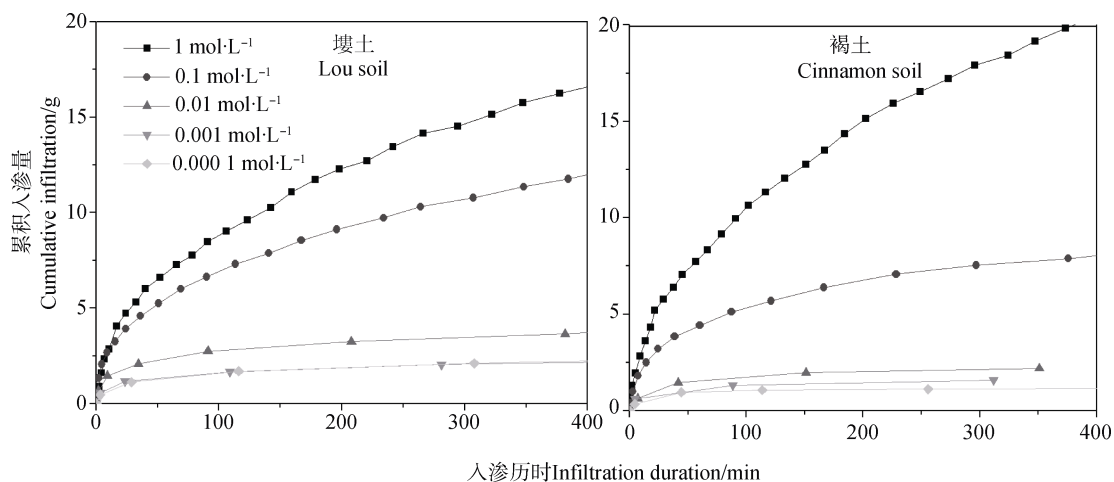


图 3 不同电解质浓度下累积入渗量的动态变化

Fig. 3 Dynamics of cumulative infiltration relative to concentration of electrolyte

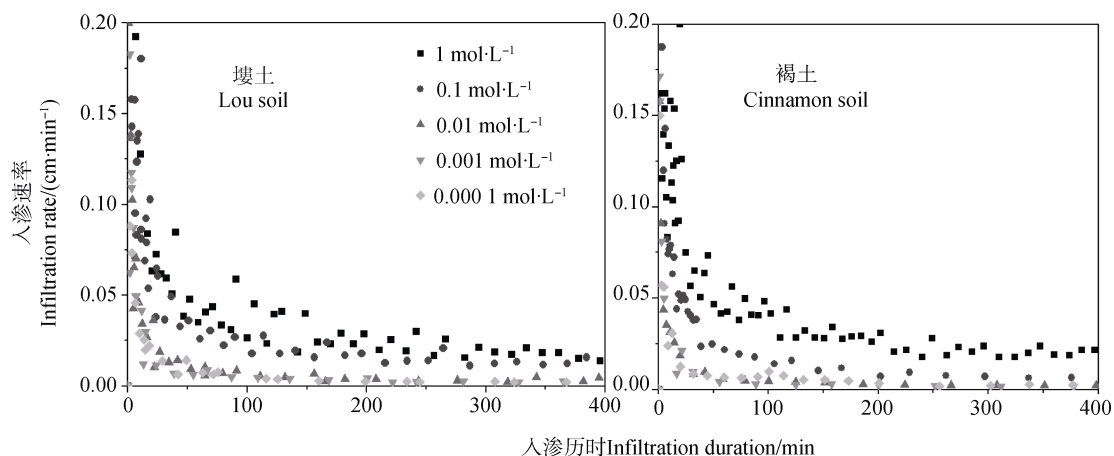


图 4 不同电解质浓度下入渗速率的动态变化

Fig. 4 Dynamics of infiltration rate relative to concentration of electrolyte

2.3 黄土水分入渗过程的模拟

为定量分析不同电解质浓度对黄土入渗性能的影响,采用 Kostiakov 模型和 Philip 模型试验数据进行拟合。对两种土壤的累积入渗量结果分别进行两种模型的拟合,拟合结果如表 3 所示,为便于表述,表中 Kostiakov 模型和 Philip 模型分别简称为 K 模型和 P 模型。

由表 3 可以看出,两种土壤各电解质浓度下,两模型的决定系数 R^2 均较大, Kostiakov 模型决定系数最大值为 0.999,最小值为 0.778; P 模型最大值为 0.997,最小值为 0.785,即 Kostiakov 模型和 Philip 模型均可对两种土壤累积入渗量随测定时间的变化情况做出较好的拟合,但比较决定系数 R^2 可知, Kostiakov 模型拟合结果更好。随着电解质浓度的降低, Kostiakov 模型参数 A 略有减小,即入渗速

率的衰减速度减缓,说明随着土壤表面电场的增强,入渗速率变化减小;参数 K 减小,第一单位时段末的累积入渗量或者第一单位时段末的入渗速率在持续减小; Philip 模型中,随着电解质浓度的降低,参数 S 减小,即吸湿率持续减小,前期入渗力减弱。

为进一步分析两种模型的适用性,对两种模型的预测值与实测值进行线性回归分析。本研究中,通过分析拟合统计特征值 (R^2 、残差平方和均方根误差 RMSE 值),比较模型的拟合精度^[30],分析模型适用性。分析结果如表 4 所示。表中 R^2 越大,残差平方和越小, RMSE 值越小,说明模型的拟合效果越好。如表 4 所示,综合上述多个统计值发现,在两种土壤中,各个浓度下的累积入渗量随测定时间的变化, Kostiakov 模型的拟合结果更优。

表 3 累积入渗量随测定时间变化情况两种模型拟合结果

Table 3 Comparison of two models fitting temporal variation of cumulative infiltration

土壤 类型 Soil type	电解质浓度 Electrolyte concentration / (mol·L ⁻¹)	K 模型 K model			P 模型 P model	
		K 值 K value	A 值 A value	决定系数 R ² Coefficient of determination	S 值 S value	决定系数 R ² Coefficient of determination
塬土 Lou soil	1	1.081	0.456	0.997	0.845	0.994
	0.1	1.103	0.398	0.999	0.629	0.977
	0.01	0.758	0.273	0.984	0.205	0.829
	0.001	0.510	0.243	0.980	0.118	0.785
	0.000 1	0.426	0.278	0.984	0.117	0.860
褐土 Cinnamon soil	1	1.171	0.476	0.998	1.019	0.997
	0.1	1.018	0.351	0.988	0.453	0.927
	0.01	0.492	0.264	0.912	0.139	0.816
	0.001	0.472	0.216	0.965	0.103	0.787
	0.000 1	0.430	0.166	0.778	0.153	0.849

表 4 两种模型下累积入渗量实测值与预测值回归分析统计值

Table 4 Regression statistics of measured and predicted cumulative infiltrations relative to model

土壤 类型 Soil type	电解质浓度 Electrolyte concentration / (mol·L ⁻¹)	模型 Model	决定系数 R ² Coefficient of determination	残差平方和 Residual sum of squares	均方根误差 RMSE
塬土 Lou soil	1	K	0.998	1.907	0.266
		P	0.995	4.177	0.437
	0.1	K	0.999	0.249	0.114
		P	0.992	2.264	0.608
	0.01	K	0.987	0.131	0.139
		P	0.945	0.551	0.623
	0.001	K	0.986	0.027	0.075
		P	0.925	0.142	0.407
	0.000 1	K	0.989	0.028	0.077
		P	0.94	0.151	0.357
褐土 Cinnamon soil	1	K	0.998	3.03	0.301
		P	0.997	4.769	0.392
	0.1	K	0.99	0.873	0.264
		P	0.961	3.539	0.759
	0.01	K	0.943	0.082	0.145
		P	0.873	0.182	0.501
	0.001	K	0.983	0.009	0.054
		P	0.922	0.039	0.331
	0.000 1	K	0.826	0.086	0.121
		P	0.631	0.182	1.565

2.4 土壤电场对水分入渗特性的影响

土壤表面电场对土壤水分入渗特性具有重要影响^[10]。本研究发现,随着本体溶液电解质浓度降低,土壤表面电位升高,颗粒周围电场增强(图 1)。不同电解质浓度条件下,土壤水分入渗特性不尽相同,表现为:随本体溶液电解质浓度的减小,湿润锋运移速度、水分入渗速率和累积入渗量均减小(图 2~图 4)。这表明,随着本体溶液电解质浓度的降低,土壤电场的增强,土壤水分运动受到极大地限制,这与 Yu 等^[10]的研究结果一致。也有研究表明微咸水中的盐分可以促进土壤水分的入渗^[31]。入渗时间相同的情况下,微咸水入渗的累积入渗量以及湿润锋运移深度均大于淡水入渗^[32]。以上结果主要定性地归因于本体溶液电解质浓度对土壤颗粒双电层结构的影响,进而影响水分入渗^[10]。随着本体溶液电解质浓度的增加,土壤颗粒扩散双电层受到反号离子较大程度地压缩,进而降低土壤颗粒周围电场强度和分布^[33]。本研究中,根据经典双电层理论,定量计算了不同电解质浓度条件下颗粒表面电位和土壤颗粒周围电场强度的大小及分布。随着本体溶液电解质浓度的降低,土壤电场增强,颗粒间的强电场作用将会深刻地影响团聚体的稳定性,继而影响土壤孔隙状况,并最终影响土壤水分运动^[10]。电解质浓度变化所引起的较小的颗粒表面电场的变化使得宏观上的入渗特性产生了较大的变化。

随入渗时间延长,入渗速率减小,湿润锋运移速度减慢,累积入渗量增加幅度变缓(图 2~图 4)。这主要是因为当入渗液体进入土体后,上层湿土的毛管吸力作用强于下层,对主要依靠重力的下渗过程产生抑制作用,加上表层团聚体破碎后造成的结皮阻碍了土层气体排出,使得入渗能力随入渗过程的进行有一定程度的减弱^[34]。此外,从图 2~图 4 也可以看出,随着电解质浓度的降低,相同时间间隔下各入渗特性参数变化量均减小。这主要是因为低浓度条件下土壤电场较强,入渗溶液对土壤团聚体结构破坏力较大^[6],土壤孔隙变小,入渗能力的衰减速度相比高浓度、大孔隙下的衰减速度较慢^[26],故 Kostiakov 模型参数 A 随电解质浓度降低略有减小,即随电解质浓度降低,土壤表面电场的增强,入渗速率的衰减速度减缓。随着电解质浓度的降低,Philip 模型参数 S 减小,即吸渗率持续减小,Kostiakov 模型参数 K 减小,即前期入渗能力减弱,

可解释为表层土壤随着被入渗溶液浸湿,土壤电场急剧增大,团聚体结构破碎而释放大颗粒,阻塞土壤孔隙,致使土壤水力传导度降低^[6]。

3 结 论

土壤表面电场强烈地影响上述两种黄土母质发育土壤的水分入渗特性。随着电解质浓度的降低,土壤颗粒的表面电位(绝对值)和电场的急剧增大,导致土壤湿润锋运移速度、入渗速率和累积入渗量减小。电解质浓度 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 是影响土壤入渗过程中各特征参数的临界点。当电解质浓度 $< 0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,壤土和褐土的表面电位绝对值大于 233 mV 和 223 mV 时,土壤水分入渗特性参数随时间的变化曲线较为接近。通过对累积入渗量随测定时间的变化情况拟合分析,发现 Kostiakov 模型和 Philip 模型均可对这一变化情况做出较好的拟合。综合各统计值比较分析后发现,在两种土壤中 Kostiakov 模型拟合效果更优。

参 考 文 献

- [1] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学. 北京:清华大学出版社, 1988
Lei Z D, Yang S X, Xie S C. Soil water dynamics (In Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 1988
- [2] 莫斌,陈晓燕,杨以翠,等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究. 水土保持研究, 2016, 23(1): 13—17
Mo B, Chen X Y, Yang Y C, et al. Research on soil infiltration capacity and its influencing factors in different land uses (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 13—17
- [3] 吴秋菊,吴佳,王林华,等. 黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响. 土壤学报, 2015, 52(2): 303—311
Wu Q J, Wu J, Wang L H, et al. Effects of soil crusts on infiltration in slope land in the loess area (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(2): 303—311
- [4] 赵勇钢,赵世伟,曹丽花,等. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响. 农业工程学报, 2008, 24(6): 14—20
Zhao Y G, Zhao S W, Cao L H, et al. Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semi-arid typical grassland areas (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 14—20
- [5] Hu F N, Liu J F, Xu C Y, et al. Soil internal forces initiate aggregate breakdown and splash erosion.

- Geoderma, 2018, 320: 43—51
- [6] Hu F N, Xu C Y, Li H, et al. Particles interaction forces and their effects on soil aggregates breakdown. *Soil and Tillage Research*, 2015, 147: 1—9
- [7] 黄学茹, 李航, 李嵩, 等. 土壤电场与有机大分子的耦合对土壤团聚体稳定性的影响. *土壤学报*, 2013, 50 (4): 734—742
Huang X R, Li H, Li S, et al. Effect of coupling of electric field and organic macromolecular on soil aggregate stability(In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (4): 734—742
- [8] 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. *农业机械学报*, 2010, 41 (7): 64—69, 75
Wu Z D, Wang Q J. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41 (7): 64—69, 75
- [9] 郭太龙, 迟道才, 王全九, 等. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究. *农业工程学报*, 2005, 21 (S1): 84—87
Guo T L, Chi D C, Wang Q J, et al. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water(In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21 (S1): 84—87
- [10] Yu Z H, Li H, Liu X M, et al. Influence of soil electric field on soil water movement in soil. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 263—270
- [11] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响. *土壤学报*, 2007, 44 (5): 801—807
Zhou B B, Shao M A. Effect of content and size of rock detritus on infiltration (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (5): 801—807
- [12] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究. *土壤学报*, 2010, 47 (4): 611—620
Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (4): 611—620
- [13] Li H, Hou J, Liu X M, et al. Combined determination of specific surface area and surface charge properties of charged particles from a single experiment. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 (6): 2128—2135
- [14] Liu X M, Li H, Du W, et al. Hofmeister effects on cation exchange equilibrium: Quantification of ion exchange selectivity. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117 (12): 6245—6251
- [15] Li S, Li H, Hu F N, et al. Effects of strong ionic polarization in the soil electric field on soil particle transport during rainfall. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66 (5): 921—929
- [16] Li S, Li H, Xu C Y, et al. Particle interaction forces induce soil Particle transport during rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77 (5): 1563—1571
- [17] Agassi M, Shainberg I, Morin J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45 (5): 848—851
- [18] Smiles D E, Smith C J, Kirkham J. On the use of solute water fronts to measure nitrate adsorption in a Red Ferrosol. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63 (2): 200—210
- [19] 黄昌勇, 徐建明. *土壤学*. 北京: 中国农业出版社, 2010
Huang C Y, Xu J M. *Pedology (In Chinese)*. Beijing: China Agriculture Press, 2010
- [20] Mao L L, Li Y Z, Hao W P, et al. An approximate point source method for soil infiltration process measurement. *Geoderma*, 2016, 264: 10—16
- [21] Wu G L, Yang Z, Cui Z, et al. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 54—60
- [22] Li H, Qing C L, Wei S Q, et al. An approach to the method for determination of surface potential on solid/liquid interface: Theory. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 275 (1): 172—176
- [23] Kostikov A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Soil Science*, 1932, 97 (1): 17—21
- [24] Philip J R. An infiltration equation with physical significance. *Soil Science*, 1954, 77 (2): 153—158
- [25] 郭华, 樊贵盛. 冻融土壤 Kostikov 入渗模型参数的非线性预报模型. *节水灌溉*, 2015, 11: 1—4, 8
Guo H, Fan G S. Kostikov parameter nonlinear prediction model for thawing soil water infiltration (In Chinese). *Water Saving Irrigation*, 2015, 11: 1—4, 8
- [26] 袁建平, 张素丽, 张春燕, 等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异. *土壤学报*, 2001, 38 (4): 579—583
Yuan J P, Zhang S L, Zhang C Y, et al. Spatial variation of steady water infiltration rates of small watershed in hilly and gully Loess region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38 (4): 579—583
- [27] 刘春成, 李毅, 任鑫, 等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性. *农业工程学报*, 2011, 27 (5): 62—67
Liu C C, Li Y, Ren X, et al. Applicability of four infiltration models to infiltration characteristics of water repellent soils (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (5): 62—67
- [28] Hillel D. Applications of soil physics. *Engineering Geology*, 1980, 19 (1): 70—71
- [29] 白文波, 宋吉青, 李茂松, 等. 保水剂对土壤水分垂直

- 入渗特征的影响. 农业工程学报, 2009, 25(2): 18—23
- Bai W B, Song J Q, Li M S, et al. Effect of super absorbent polymer on vertical infiltration characteristics of soil water (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25 (2): 18—23
- [30] 邢旭光, 张盼, 马孝义. 掺混菜籽油渣减少土壤入渗改善持水特性. 农业工程学报, 2017, 33(2): 102—108
- Xing X G, Zhang P, Ma X Y. Rapeseed dreg additive reducing soil infiltration and improving water retention (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (2): 102—108
- [31] 张俐, 余冬立, 傅瑜, 等. 入渗水水质对土壤导水特性影响的试验研究. 水土保持学报, 2017, 31(4): 64—68, 80
- Zhang L, She D L, Fu Y, et al. Experimental study of soil hydraulic characteristics influenced by infiltration water quality (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31 (4): 64—68, 80
- [32] 毕远杰, 王全九, 雪静. 淡水与微咸水入渗特性对比分析. 农业机械学报, 2010, 41 (7): 70—75
- Bi Y J, Wang Q J, Xue J. Infiltration characteristic contrast analysis of fresh water and saline water (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41 (7): 70—75
- [33] Levy G J, Mamedov A I, Goldstein D. Sodicity and water quality effects on slaking of aggregates from semi-arid soils. Soil Science, 2003, 168 (8): 552—562
- [34] 唐胜强, 余冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响. 农业机械学报, 2016, 47 (10): 108—114
- Tang S Q, She D L. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (10): 108—114

Water Infiltration in Soils Developed from Loess Affected by Surface Electric Field and Simulation

YANG Zhihua^{1,3} HU Feinan^{1,2} LIU Jingfang² XU Chenyang² MA Rentian²
WANG Zilong² ZHAO Shiwei^{1,2†}

(1 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)

(2 College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

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

Abstract 【Objective】 The Loess Plateau of China is one of the world's most severely eroded regions. In this region water shortage is the main limiting factor in agricultural production and ecological environment construction. Therefore, it is of great significance to improve utilization efficiency of the limited water resources in the region to the maintenance of regional ecological environment security and efficient development of green agriculture. The process of soil water infiltration not only determines utilization rate of the limited water sources, such as precipitation and irrigation, but also profoundly affects intensity of surface runoff and soil erosion. Soil water infiltration is mainly affected by soil organic matter content, bulk density, texture, structure stability and soil porosity, water quality and so on. Recent researches have demonstrated that soil surface electric field influences soil water infiltration by affecting stability of soil aggregates and distribution of soil pores. Although quite a number of studies have been reported on water infiltration, water availability and their affecting factors in soils developed from Loess, it is still not clear that how soil interfacial properties (surface electric field and surface potential of soil particles) vary in the process of water infiltration and affect water infiltration characteristics and how applicable the classical soil water infiltration model is when effect of the surface electric field is taken into account. So further studies need to be done. 【Method】 In this study, two representative Loess soils, Lou soil and Cinnamon soil, were used. According to the double layer theory of charged particles, the surface electric field of soil particles could be quantitatively adjusted by applying a series of electrolyte solutions different in concentration. Soil water infiltration rate, moisture front migration and cumulative infiltration in the two soils was determined. The Kostiakov model and the Philip model was used to fit the process of soil water infiltration. 【Result】 Results show: (1) Wetting front movement, infiltration rate and cumulative infiltration decreased with decreasing electrolyte concentration and increasing surface potential (absolute value), which indicates that surface electric field of soil particles strongly affects soil water

infiltration; (2) When electrolyte concentration in the bulk solution was less than $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ or absolute surface potential value of the Lou soil and Cinnamon soil was more than 233 mV and 223 mV, the temporal variation curves of soil water infiltration in the two soils were close to each other, which indicates that 233 mV and 223 mV is the critical potential value of the soil water infiltration process in Lou soil and Cinnamon soil, respectively; and (3) The Kostiakov model and the Philip model were both applicable to simulating infiltration processes in Lou soil and Cinnamon soil. Further analyses of the fitting parameters—correlation coefficient (R^2), residual sum of squares, and root mean square error (RMSE) shows that the Kostiakov model was more suitable than the Philip model. 【Conclusion】 All the findings demonstrate that the process of soil water infiltration is greatly influenced by soil surface electric field. There are critical surface potentials controlling water infiltration. The findings provide a theoretical reference for development of new techniques to regulate water infiltration based on soil internal forces.

Key words Soil surface electric field; Wetting front; Infiltration rate; Cumulative infiltration; Infiltration model

(责任编辑：檀满枝)