

土粒表面电场对典型黑土团聚体稳定性及水分入渗特性的影响

李喆¹, 胡斐南^{1,2}, 杨志花², 郭威震¹, 王子龙¹, 赵世伟^{1,2}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 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:水土资源高效利用是农业绿色发展的重要内容,也是保障我国东北黑土区肥沃耕地资源健康可持续发展的关键。土壤水分入渗性能会对农业生产和生态环境造成双重影响,因此研究土壤水分运动及其影响机理具有重要的科学价值和实践意义。通过设置 5 个电解质溶液浓度梯度(1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.000 1 mol/L)来定量调控土壤颗粒表面电场,研究不同电场强度下黑土团聚体的稳定性及水分入渗特性。结果表明:(1) 随溶液电解质浓度的减小,土壤颗粒表面电位(绝对值)和电场强度均增大,从而导致土壤团聚体稳定性表现出先急剧减小而后保持稳定的趋势,0.01 mol/L 是团聚体稳定性发生变化的转折点。(2) 在水分入渗过程中,随入渗溶液电解质浓度的减小、土粒表面电位(绝对值)和电场强度的增大,湿润锋运移位置、入渗速率和累积入渗量均减小。土壤水分平均入渗速率和稳定入渗速率均随电解质浓度的降低表现出先急剧减小而后保持稳定的趋势。(3) 土粒表面电场通过影响团聚体稳定性,改变土壤孔隙通道,进而影响水分入渗过程。该研究结果揭示了土粒表面电场对东北黑土区水分入渗及土壤结构稳定性的重要影响,可为黑土区土壤水分高效利用及土壤侵蚀防控提供一定的理论参考。

关键词:表面电位; 电场强度; 团聚体稳定性; 入渗速率; 累积入渗量

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)05-0061-06

Effect of Soil Surface Electric Field on Aggregate Stability and Water Infiltration of Typical Black Soil

LI Zhe¹, HU Feinan^{1,2}, YANG Zhihua², GUO Weizhen¹, WANG Zilong¹, ZHAO Shiwei^{1,2}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

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 effective utilization of water and soil resources is important for sustainable agricultural development, and also critical for the reasonable development of fertile land resources in the black soil region of the northeast China. Soil water infiltration affects both the agricultural production and the ecological environment. In this study, 5 electrolyte solutions with concentrations of 1, 0.1, 0.01, 0.001 and 0.000 1 mol/L were adopted to quantitatively adjust the surface electric field around soil particles for investigating the effect of surface electric field strength on black soil aggregate stability and water infiltration. The results show that: (1) with the decrease of electrolyte concentration, the surface potential (in absolute value) and electric field strength of soil particles increase; as a result, soil aggregates changed from stability into instability with 0.01 mol/L being the turning point of soil aggregate stability; (2) in the process of soil water infiltration, the position of wetting front, infiltration rate and cumulative infiltration amount all decrease with the decrease of electrolyte concentration; moreover, the average soil water infiltration rate and stable infiltration rate show the same tendency with that of soil aggregate stability; average soil water infiltration rate and stable infiltration rate first decrease greatly from 1 mol/L to 0.01 mol/L, then the variation is much more gentle

收稿日期: 2020-10-26

修回日期: 2020-11-16

资助项目: 国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项“黑土侵蚀防治机理与调控技术”(2016YFE0202900); 国家自然科学基金面上项目“土壤内外力耦合驱动的团聚体破碎及降雨侵蚀响应”(41977024)

第一作者: 李喆(1996—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤水分运动的研究。E-mail: Lz20200101@126.com

通信作者: 赵世伟(1962—), 男, 四川宜宾人, 博士, 研究员, 主要从事植被与土壤互动关系研究。E-mail: swzhao@nwfau.edu.cn

with further decrease of electrolyte concentration; (3) soil surface electric field affects the process of water infiltration through affecting the stability of soil aggregates and changing the distribution of soil pore channels. These result reveal that soil electric field can be of vital significance to water infiltration and aggregate stability of the black soil in the northeast China, which can provide theoretical references for the efficient utilization of soil water and the prevention of soil erosion.

Keywords: surface potential; electric field strength; aggregate stability; infiltration rate; cumulative infiltration amount

土壤水分入渗是连接地表径流与地下水的重要过程,这一过程决定着降水、灌溉水进入土壤的速度和数量,从而影响供给农作物生长所需有效水的数量^[1-2]。土壤水分入渗特性是表征土壤水分运动和抗侵蚀能力的重要指标^[1-2]。因此,研究土壤水分入渗特性对优化区域水循环过程,改善作物根区的水分分布和对水分的有效利用情况,从而提高农作物产量具有重要的科学价值和实践意义。

土壤是一个开放复杂的体系,因此其水分入渗过程也必然会受到多种因素的影响,包括土壤有机质含量、结构稳定性、供水电解质浓度等^[3-4]。赵勇钢等通过对不同恢复年限的草地土壤水分入渗过程的研究表明,土壤结构的稳定性对水分入渗有重要影响^[5]。团聚体作为土壤结构的基本单元,其稳定程度可反映土壤结构的稳定性^[5-6]。徐爽等研究表明,提高无机氮肥的施用量,增加土壤溶液浓度,有利于提高团聚体的稳定性,改善土壤结构^[7]。Markgraf 和 Dörthe 研究表明,增大土壤溶液中 KCl 的含量可以提高团聚体的稳定性^[8-9]。吴忠东等研究表明,当入渗水矿化度小于 3.0 g/L 时,随着入渗水矿化度的增大,其土壤团聚体的破碎强度减小,土壤结构稳定性增强,使土壤大孔隙数量增加,水分入渗能力增强^[10]。由此可知,土壤溶液性质的变化可通过影响土壤团聚体稳定性来影响土壤水分入渗过程。目前,人们主要认为土壤溶液主要是通过影响土壤矿物的膨胀和消散作用进而使团聚体发生破碎而影响水分入渗^[7,11-12]。然而,新近的研究表明,在 1~1 000 nm 尺度上,土壤带电颗粒相互作用力可高达数百甚至上千个大气压,是引发团聚体破碎的主要内在动因^[11-13]。当团聚体破碎后,会释放大量的细小颗粒,堵塞土壤孔隙,降低水分入渗速率,加速地表径流的形成,进而引发土壤侵蚀^[14-15]。Hu 等发现,随着溶液浓度的升高,土壤颗粒表面电位降低,导致土壤颗粒间电场作用减弱,从而使得团聚体稳定性增加^[11-12]。Yu 等通过控制入渗溶液电解质浓度来定量调控土壤颗粒表面电场,研究了电场对紫色土水分入渗的影响,发现随着溶液浓度的升高,土壤电场强度降低,水分入渗速率升

高^[14]。可见,土壤电场强度对水分入渗特性有着重要影响。

东北黑土区是世界三大黑土区之一,总面积约 103 万 km²^[2]。该地区地形相对平坦,土地肥沃,是我国重要的商品粮产地,但是由于多年的土地不合理开发利用,导致黑土结构明显破坏,有机质含量和持水性降低,土壤退化现象严重^[16-17]。因此,提高该地区的水分入渗效率可减少地表径流的形成,从而减轻水土流失。近年来关于黑土区水分入渗的研究为该区域的水土保持工作提供了重要的科学理论依据,但对于介观尺度上土壤电场对黑土团聚体稳定性及水分入渗的影响尚不清楚。因此,本研究计算典型黑土在 1:1 型电解质溶液中的电场强度,采用沉降法和一维定水头垂直入渗法测定团聚体稳定性和水分入渗特性,在此基础上综合分析不同电场强度对团聚体稳定性和水分入渗特性的影响。研究结果为进一步改善该区土壤结构的稳定性和水分利用效率提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤于 2018 年 11 月在黑龙江省宾县(127°25′36″E,45°45′22″N)采集,采取农田表层土壤(0—20 cm)40 kg。将采集的土壤去除杂质,风干后装袋备用。该地属于典型的薄层黑土区,平均海拔约 450 m,气候类型属于温带大陆性气候,年平均气温 4.4℃,年平均降雨量 570 mm。土壤基本理化性质的测定方法如下:用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量,含量为 28.9 g/kg;用电极法(土水比为 1:2.5)测定土壤 pH,其值为 6.3;阳离子交换量(CEC)和比表面积(SSA)用物质表面性质联合测定法测定^[18-19],其值分别为 21.3 cmol/kg,58.6 m²/g;用激光颗粒分析仪测定土壤颗粒组成(MS 2000,马尔文仪器有限公司,英国),黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和砂粒(0.02~2 mm)含量分别为 32.9%,24.7%和 42.4%。

1.2 饱和样品制备

为定量获取土壤颗粒周围电场强度及分布,根据

研究需要首先对土壤样品进行表面处理,简化研究体系,制备成饱和样品,获得模型团聚体。本研究选取黑土中含量较高的 K^+ 来定量调控电场,使用 KCl 溶液制备 K^+ 土壤饱和样品。 K^+ 单一离子饱和样品的制备过程如下^[11-13]:称取 2 kg 风干土样,置于大烧杯中,加入 KCl 溶液,搅拌,采用大容量离心机分次离心,倒掉上清液,重复上述操作 3 次;然后用纯水替代 KCl 溶液重复上述步骤,以洗去土壤表面吸附的多余 K^+ ,最后烘干,过 $<1\text{ mm}$ 筛封存储备用。

1.3 试验方法

试验于 2018 年 12 月—2019 年 04 月在中国科学院水利部水土保持研究所完成。本研究采用沉降法测定土壤团聚体稳定性^[20]。方法如下:称取 $<1\text{ mm}$ 的 K^+ 饱和土样 20 g,缓慢倒入盛有 450 ml 的不同浓度的 KCl 溶液的量筒中,溶液浓度分别设置为 1,0.1,0.01,0.001,0.000 1 mol/L,然后用相应浓度的 KCl 溶液定容至 500 ml,用封口膜将量筒口密封。静置 1 min 后,托住密封口,将量筒缓慢地上下颠倒 4 次,每次间隔 30 s,最后一次颠倒后记录秒表时间,静置。根据斯托克斯公式计算静置时间并提取 $<10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $<5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物。最后在 105℃ 条件下将悬液烘干称重,并计算土壤团聚体破裂后释放的 $<10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $<5\text{ }\mu\text{m}$ 的微粒或微团聚体含量。破裂量越大说明该溶液浓度下团聚体越不稳定,越小则说明团聚体相对稳定。

土壤入渗特性采用一维积水定水头垂直入渗法进行测定^[14-15,21]。参照黑土实际容重和入渗装置的装土槽体积,将试验土壤容重设置为 1.35 g/cm^3 ,分层填装,层间打毛。土柱顶部铺垫滤纸,以防止开始时入渗速度过快而增加读数误差;土柱底部铺垫滤纸,可防止土粒通过下部隔板小孔漏失^[22]。为科学准确的采集试验数据,采用先密后疏的原则依次记录湿润锋运移位置变化所对应入渗时间^[21]。当入渗时间达 300 min 或湿润锋位置到达 20 cm 后,停止试验。每间隔 0.5 cm 取一段土,烘干,分别称量烘干前后的土体质量,计算每段土的含水率和土壤累积入渗量等相关数据^[23-24]。为定量调控土壤表面电场强度,且涵盖实际土壤溶液浓度,研究中所用的 KCl 溶液浓度设置为 1,0.1,0.01,0.001,0.000 1 mol/L,共 5 个梯度。

1.4 数据计算与分析

在 1:1 型电解质溶液中,土壤胶体表面电位及电场强度的计算公式如下^[13-14,25]:

$$\varphi_0 = -\frac{2RT}{ZF} \ln \frac{1-a}{1+a} \tag{1}$$

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

$$\kappa = \sqrt{\frac{8\pi F^2 Z^2 C_0}{\epsilon RT}} \tag{3}$$

式中: φ_0 代表土壤颗粒表面电(V); R 为气体常数, $8.31\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; Z 表示阳离子的化合价; F 为法拉第常数(C/mol); T 为绝对温度(298K); a 表示方程中间变量; κ 为德拜—休克尔系数($1/\text{dm}$); C_0 表示本体溶液中阳离子的平衡浓度(mol/L); C 表示阳离子交换量(cmol/kg); S 为比表面积(m^2/g)。 ϵ 表示介电常数 $[\text{C}^2/(\text{J} \cdot \text{dm})]$;

$$E_{(x)} = -\sqrt{\frac{8\pi RT}{\epsilon}} [C_0 (e^{\frac{-ZF\varphi(x)}{RT}} - 1)] \tag{4}$$

$$\varphi_{(x)} = \frac{4RT}{F} \tanh^{-1}(be^{-\kappa x}) \tag{5}$$

$$b = \tanh(F\varphi_0/4RT) \tag{6}$$

式中: $E_{(x)}$ 表示距离表面 x 处的电场强度(V/m); $\varphi_{(x)}$ 表示距离颗粒表面 x 处的电位(V); x 表示距离颗粒表面的距离(nm); b 表示中间变量。

本研究采用 Excel 2012 进行数据处理,Origin 9.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 土壤表面电化学性质

将阳离子交换量(CEC)和比表面积(SSA)带入上述式(1—3)中,可计算不同电解质浓度下土壤表面电位(表 1),土壤颗粒表面电位(绝对值)表现出随本体溶液电解质浓度的增大而减小的趋势。例如,当电解质浓度为 0.000 1 mol/L 时,表面电位(绝对值)高达 327.9 mV;当电解质浓度增大为 1 mol/L 时,表面电位(绝对值)则降为 -101.3 mV。由此可知,电解质浓度从 0.000 1 增至 1 mol/L,表面电位(绝对值)减小了 3.24 倍。

表 1 不同电解质浓度下的土壤表面电位

| 电解质浓度/(mol · L ⁻¹) | 表面电位/mV |
|--------------------------------|---------|
| 1 | -101.3 |
| 0.1 | -154.4 |
| 0.01 | -210.9 |
| 0.001 | -269.1 |
| 0.0001 | -327.9 |

将表 1 中各浓度下的表面电位值代入式(4—6)中,可计算得不同电解质浓度下土壤电场强度随颗粒表面距离的分布曲线(图 1)。在接近土粒表面的位置,土壤电场强度可高达 $10^8\text{ V}/\text{m}$ 。5 个浓度下,其电场强度均随着颗粒表面距离的增大而持续衰减。随溶液电解质浓度减小,电场的作用距离增大。例如,当电解质浓度为 1 mol/L 时,电场作用距离约为

10 nm;而当电解质浓度减小为 0.001 mol/L 时,电场的作用距离在 100 nm 以上。

为定量表征相同距离下,电场强度随电解质浓度的变化规律。以颗粒间距离为 5 nm 为例,电场强度随电解质浓度的变化见图 2。由图可知,随电解质浓度减小,电场强度先急剧增大,后保持稳定,0.01 mol/L 是电场强度增长速率发生转变浓度。这一结果表明高电解质浓度屏蔽土壤颗粒周围的电场的能力显著高于低电解质浓度。综上所述,土壤颗粒周围电场强度大小及其分布可通过改变土壤溶液电解质浓度来调控。

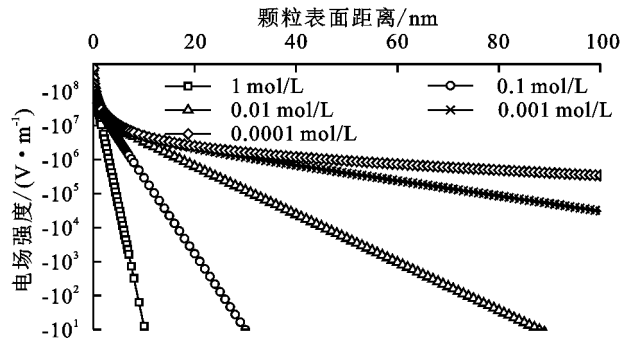


图 1 土粒周围电场强度随电解质浓度和距离的变化

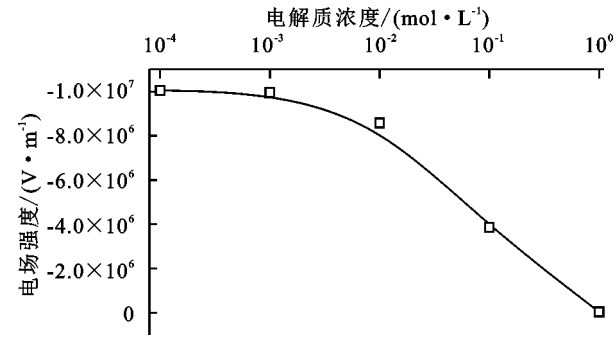


图 2 电场强度在 5 nm 处随电解质浓度的变化

2.2 土壤电场对黑土团聚体稳定性的影响

作为土壤结构的基本单元,增加团聚体稳定性对于改善土壤理化性质、调节土壤水肥气热、增加土壤结构稳定性、减少水土流失等方面具有重要意义^[26-27]。由图 3 可知,随着电解质浓度的降低,团聚体破碎后释放<5 μm 和<10 μm 粒径的小颗粒呈现先急剧增加而后保持稳定的趋势。这表明,当本体溶液电解质浓度被稀释后,土粒表面电场强度增大,土壤团聚体的稳定性将表现为先减小而后保持稳定的趋势。可将其分为两个阶段,第一阶段,团聚体破碎强度迅速增加,即破碎后释放的小颗粒数量增加较多;第二阶段,团聚体破碎强度增加缓慢,并趋于稳定。0.01 mol/L 是影响团聚体破碎强度的转折点。由此可知,土壤团聚体的破碎强度受到颗粒表面电场的显著影响。

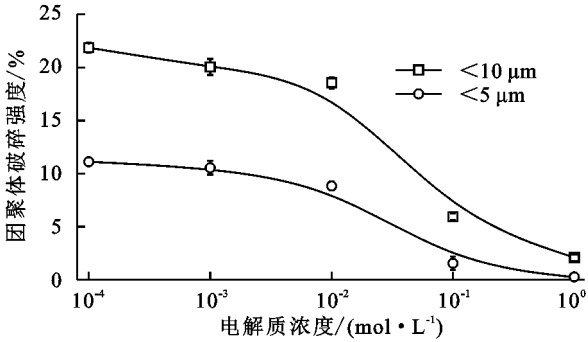


图 3 团聚体破碎强度随电解质浓度的变化曲线

2.3 土壤电场对水分入渗特性的影响

2.3.1 湿润锋位置的变化规律 在水分垂直入渗过程中,从上到下可将土壤水剖面分为四层,最下层的是湿润锋,作为土壤被水分浸湿最前端的锋面,它可以直观地反映水分在土壤中的运移情况^[2,28]。从图 4 可以看出,湿润锋位置与时间的 0.5 次方均呈正比,且在入渗初始阶段,不同电解质浓度下湿润锋位置变化曲线的重合度较高;但在入渗中后期,不同电解质浓度下湿润锋的位置变化明显,由此可知,电解质浓度的高低对湿润锋的运移速度具有重要影响。电解质浓度为 1 mol/L 时,其斜率为 1.14,而电解质浓度为 0.000 1 mol/L 时,其斜率为 0.37,较 1 mol/L 时降低 67%。此外,当电解质浓度低于 0.01 mol/L 后,湿润锋运移速度缓慢且速率相似,0.001 mol/L 和 0.000 1 mol/L 的斜率分别为 0.41,0.37,后者仅比前者低 9%;电解质浓度为 0.001,0.000 1 mol/L 时,湿润锋最大运移距离相近,分别为 8.25 cm 与 7 cm,且几乎不再随入渗时间的变化而发生改变。

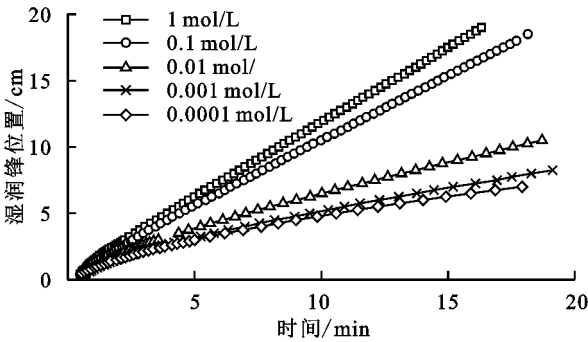


图 4 湿润锋位置随时间 0.5 次方的变化曲线

2.3.2 入渗速率的变化规律 单位时间内入渗到单位面积土壤的水分含量即为入渗速率,是表征水分在土壤中迁移速度的重要指标^[21]。由图 5 可知,5 个电解质浓度下,入渗速率随时间的变化趋势基本一致,即在入渗初始阶段(0~25 min),入渗速率的变化幅度较大,但随着时间的增加,不同电解质浓度下的入渗速率逐渐趋于稳定。入渗时间在 200 min 后,不同电解质浓度下的入渗速率基本不再发生变化,呈一条

直线。0.001,0.000 1 mol/L 的入渗速率重合度较高且低于其余 3 个浓度。

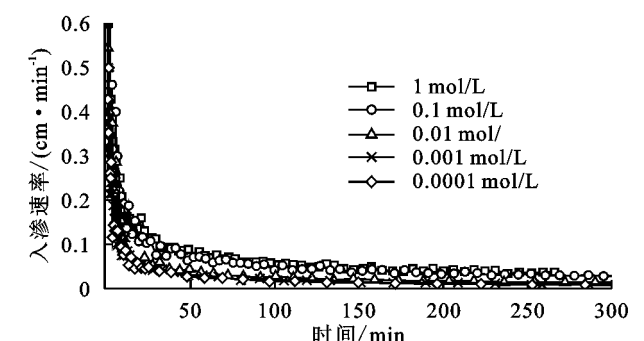


图 5 入渗速率随时间的变化曲线

由图 6 可知,随着入渗时间的增加,入渗速率逐渐趋于稳定。稳定入渗速率是反映土壤入渗能力的一个重要指标^[10,22]。平均入渗速率是湿润锋运移的总距离与总时间的比值,可以作为评价入渗速率的整体变化规律的指标^[19,28]。由图 6 可知,两种入渗速率都随着电解质浓度的降低呈迅速下降而后保持稳定的趋势,且平均入渗速率始终比稳定入渗速率要大。1 mol/L 时的稳定入渗速率和平均入渗速率分别是 0.000 1 mol/L 的 4.72,3.56 倍。

采用经典水分入渗模型 Kostiakov 模型对数据进行拟合^[21],其公式为 $F=Kt^A$,其中 F 为入渗量(g); K 和 A 皆是拟合得到的经验参数,其意义分别是 K 代表开始时段内渗透水的数量,在数值上等于第一个单位时段末的入渗速度; A 是与土壤性质有关的参数,代表入渗速度随时间的减小程度; t 代表时间(min)。用 Kostiakov 模型拟合的结果决定系数最大值为 0.999,最小值为 0.984,皆大于 0.9,所以,此模型可以较好的对累积入渗量随时间的变化情况做出预测。 K 与 A 值都呈减小的趋势,说明随着电解质浓度的降低,入渗速率呈下降的趋势;入渗速率随时间的衰减程度逐渐下降,即趋于稳定。此模型模拟结果与入渗速率的结果分析相一致,说明本试验具有较好的可靠性。

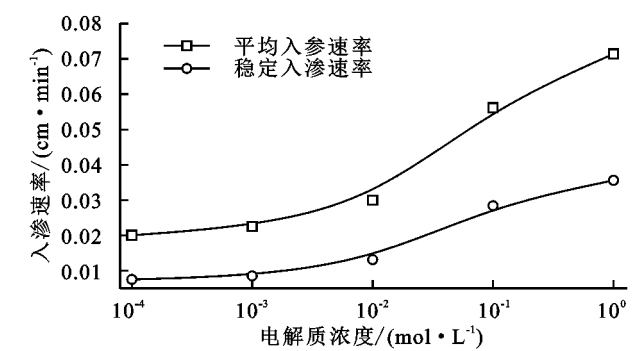


图 6 两种入渗速率随电解质浓度的变化曲线

2.3.3 累积入渗量的变化规律 在入渗达到稳定前,累积入渗量常用来表征水分在土壤中的运动特征^[21,28]。由图 7 可知,土壤累积入渗量随电解质浓度的变化趋势

基本一致,均随时间的延长逐渐增加,且增长速度逐渐变慢。在入渗的初始阶段(0~25 min),各电解质浓度下的累积入渗量差异不大,但其增长速度较快;在 25 min 后,各浓度下累积入渗量的差异逐渐明晰,即在同一时刻,随着电解质浓度的降低,累积入渗量逐渐降低;例如入渗时间为 200 min,电解质浓度为 0.000 1 mol/L 时,累积入渗量是 7.16 g;而当电解质浓度为 1 mol/L 时,累积入渗量是 19.40 g,是 0.000 1 mol/L 累积入渗量的 2.71 倍。当电解质浓度小于 0.01 mol/L 后,累积入渗量较小,且曲线基本重合。

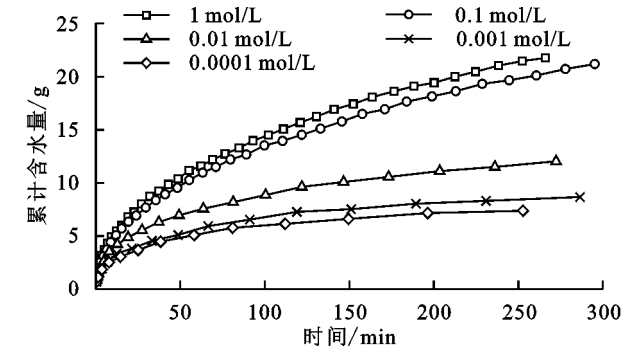


图 7 累积入渗量随时间的变化曲线

3 讨论

当水分进入土壤后,土壤团聚体遭到破坏,其稳定性下降,进而会改变土壤孔隙状况,影响水分入渗特性。本研究发现,随着溶液电解质浓度的降低,土壤团聚体破碎强度表现为先急剧增大而后保持稳定的趋势,即团聚体稳定性总体表现为降低的趋势,0.01 mol/L 是团聚体破碎强度发生改变的电解质浓度,该结果与其他土壤(紫色土和典型黄土)的研究结果一致^[11-12,14],说明对于不同的土壤类型,电场对团聚体稳定性皆有一定的影响,但是由于颗粒组成、有机质含量、离子特异性等因素的差异,其影响程度不同。根据经典胶体化学理论,土壤表面电位(绝对值)和电场强度会随着土壤溶液电解质浓度的增大而减小^[11-14],电场强度的减小意味着颗粒间的静电排斥力会急剧减小,这与本研究定量计算的结果一致。已有研究表明,土粒间的静电排斥力可高达上千个大气压,远大于通常人们所认为的消散作用和雨滴打击等作用力,它是团聚体遇水破碎的主要内在动因^[11-13]。因此,当溶液电解质浓度降低后,土粒间的电场作用会急剧增强进而导致团聚体发生破碎,这必然会引起土壤孔隙状况发生改变。

本研究发现,随本体溶液电解质浓度的增加,水分入渗过程中累积入渗量、湿润锋前行位置和水分入渗速率和均增大。张俐等研究表明,在一定范围内,随着入渗水分矿化度的增大,在相同入渗时间内的湿

润锋运移速率呈增加的趋势^[29],此结果与本研究结果相一致。当水分进入土壤后,土壤结构体并不是始终保持不变的刚性颗粒^[14-15,23]。其中,团聚体的稳定与分散被认为是影响土壤孔隙状况和水分迁移的重要因素^[14-15]。结合本研究中团聚体稳定性试验结果可以发现,随本体溶液电解质浓度的变化,各水分入渗特参数和团聚体稳定性参数的变化趋势一致。即随溶液电解质浓度的降低,团聚体稳定性降低,水分入渗过程中累积入渗量、湿润锋的迁移距离和水分入渗速率均降低。电解质浓度为 0.01 mol/L 是相同作用距离下电场强度的转折点,也是团聚体稳定性的转折点,这与水分入渗过程的转折点相同。理论计算与宏观试验结果相对应,这说明土壤电场可通过影响团聚体稳定性而最终影响水分入渗过程^[14-15,21]。

尽管本研究是采用不同浓度电解质溶液来模拟研究水分入渗特性,并指出了土壤电场作用对水分入渗过程的重要影响,但是该结果具有一定的普适性。例如:在自然条件下,当雨水或灌溉水进入土壤后,土壤溶液浓度将会迅速被稀释,根据本研究结果可知,此时的土壤带电颗粒周围电场会急速增强,颗粒间的静电斥力增大,导致团聚体结构发生破碎,改变土壤孔隙状况,最终影响水分入渗过程,加速地表径流的形成,导致土壤侵蚀加重。我们的研究结果也定量地解释了,在一定范围内,随灌溉水质矿化度的增加,土壤水分入渗性能增强的原因^[10]。这是因为入渗液浓度增大后,土粒表面电位绝对值和电场强度将会降低,土粒间排斥力作用下降,团聚体稳定性增强,水分入渗性能将会增大,这一试验结果为东北地区土壤水分和水土流失调控提供了一定的理论依据,对于我国淡水资源的保护具有重要意义。

4 结论

(1) 黑土团聚体稳定性受到土壤电场的强烈影响。随着土壤本体溶液电解质浓度的降低,土壤表面电位和电场均增强,团聚体稳定性降低,其中 0.01 mol/L 是黑土表面电场和团聚体发生破碎的关键转折点。

(2) 土粒表面电场对黑土水分入渗过程具有重要的影响。随着土壤本体溶液电解质浓度的降低,土壤表面电位和电场均增强,黑土水分入渗速率、湿润锋运移距离和累计入渗量均降低。电解质浓度为 0.01 mol/L 是水分入渗特性发生转变的关键转折点。

(3) 当水分进入土壤后,土壤本体溶液电解质浓度降低,土壤表面电场增强,土壤团聚体发生破碎,土壤孔隙被堵塞,最终导致土壤水分入渗速率降低。

参考文献:

- [1] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(3):188-190.
- [2] 魏永霞,王鹤,刘慧,等.生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J].农业机械学报,2019,50(9):290-299.
- [3] 李卓,刘永红,杨勤.土壤水分入渗影响机制研究综述[J].灌溉排水学报,2011,30(5):124-130.
- [4] 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[J].农业机械学报,2016,47(10):108-114.
- [5] 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[J].农业工程学报,2008,24(6):14-20.
- [6] 邹洪涛,王胜楠,闫洪亮,等.秸秆深还田对东北半干旱区土壤结构及水分特征影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):52-60.
- [7] 徐爽,王益权,王浩,等.不同肥力水平土壤团聚体的稳定性及对氮肥盐溶液的响应[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1135-1143.
- [8] Markgraf W, Horn R. Rheological-stiffness analysis of K-treated and CaCO₃-rich soils[J]. Plant Nutr. Soil Sci., 2006,169(3):411-419.
- [9] Dörthe H, Stephan P, Horn R. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters[J]. Soil and Tillage Research, 2010,111(1):75-85.
- [10] 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):64-69,75.
- [11] Hu F N, Liu J F, Xu C Y, et al. Soil internal forces initiate aggregate breakdown and splash erosion[J]. Geoderma, 2018,320:43-51.
- [12] Hu F N, Xu C Y, Li H, et al. Particles interaction forces and their effects on soil aggregates breakdown[J]. Soil and Tillage Research, 2015,147:1-9.
- [13] 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[J]. European Journal of Soil Science, 2015,66(5):921-929.
- [14] Yu Z H, Li H, Liu X M, et al. Influence of soil electric field on water movement in soil[J]. Soil & Tillage Research, 2016,155:263-270.
- [15] Gong Y, Tian R, Li H. Coupling effects of surface charges, adsorbed counterions and particle-size distribution on soil water infiltration and transport[J]. European Journal of Soil Science, 2018,69(6):1008-1017.
- [16] 王睿垠,魏永霞,张翼鹏,等.生物炭对东北草甸黑土水力特性影响的数值化研究[J].农业机械学报,2018,49(5):277-286.