

容重及含水率对土壤电导率的影响研究

张一清,王文娥,胡明宇,凌刚,胡笑涛,彭雄彪

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:土壤电导率能够间接反映田间养分或盐分含量,通过监测土壤电导率可以掌握土壤养分或盐分运移和利用情况。本文通过2种土壤容重、5种含水率条件下土柱入渗试验,利用5TE传感器对土壤体积含水率、体积电导率、温度等参数进行连续监测,分析容重及含水率对土壤电导率的影响。结果表明:在入渗过程中,含水率和电导率均先增大后逐渐减小,最后趋于平缓;电导率开始减小的时间较含水率开始减小的时间略有提前;当体积含水率一定时,孔隙水电导率随体积电导率的增加基本呈线性增加;随含水率的增大,孔隙水电导率随体积电导率增大的速率变慢;当体积电导率一定时,随着含水率的增加,孔隙水电导率逐渐减小,容重为 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时减幅为 $9.52\%\sim 55.51\%$,容重为 $1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时减幅为 $9.72\%\sim 54.62\%$;孔隙水电导率一定时,体积电导率随含水率的增加而增大,容重为 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时增幅为 $10.51\%\sim 124.75\%$,容重为 $1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时增幅为 $10.76\%\sim 120.35\%$ 。对于2种容重情况,相同含水率下孔隙水电导率与体积电导率呈线性关系;在孔隙水电导率相同时,体积电导率随着容重的减小而略呈上升趋势,与容重 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 处理相比,容重 $1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 处理中含水率24%、25%、26%情况下的体积电导率分别提高1.95%、2.47%、1.44%。在入渗总水量有限时,土壤水含盐量随体积含水率的变化经历4个阶段,入渗过程中随着体积含水率持续增加,分为无盐溶出、含盐量快速增加和含盐量减小3个阶段,以及水分再分布过程中的体积含水率与含盐量均减小阶段;在第2个阶段末各工况溶出的盐量达到最大值,容重 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 处理中,平均体积含水率为20%、22.5%、25%、28%、31%的工况达到盐量最大值,分别为 3.54 、 4.95 、 7.17 、 31.73 、 $11.85\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$;第4个阶段末达到设计的平均体积含水率。孔隙水电导率与体积电导率呈线性关系,其斜率随着含水率的增加而减小,是含水率的二次函数;可采用含水率和孔隙水电导率的乘积反映土壤溶液盐分含量。

关键词:体积电导率;孔隙水电导率;体积含水率;土壤容重

中图分类号:S152;S153 **文献标志码:**A

Influence of bulk density and water content on soil electrical conductivity

ZHANG Yiqing, WANG Wen'e, HU Mingyu, LING Gang, HU Xiaotao, PENG Xiongbiao

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi, 712100, China)

Abstract: Soil electrical conductivity can indirectly reflect the nutrient or salt content in the field. Monitoring the soil electrical conductivity can help understand the transport and utilization of soil nutrients and salt. In this study, through the soil column infiltration test under the conditions of 2 soil bulk densities and 5 water contents, the 5TE sensor was used to continuously monitor soil volumetric water content, volume conductivity, temperature, and other parameters, and analyze the influence of bulk density and water content on soil conductivity. The results showed that both water content and conductivity first increased, then gradually decreased, and finally tended to be flat during the infiltration process. The time when the conductivity began to decrease was slightly earlier than the time when the water content began to decrease. When the volumetric water content was constant, the conductivity of pore water increases linearly with the increase of volumetric conductivity. With the increase of water content, the increase rate of pore water conductivity with volume water conductivity was slower. When the volume conductivity was

收稿日期:2021-07-14

修回日期:2021-09-07

基金项目:国家自然科学基金(52079113);陕西省自然科学基金(2020JM-166)

作者简介:张一清(1997-),女,陕西洛川人,硕士研究生,研究方向为工程水力学。E-mail:812806743@qq.com

通信作者:王文娥(1975-),女,河南孟县人,博士,教授,主要从事流体机械及排灌设备等方面研究。E-mail:wangwene@nwsuaf.edu.cn

constant, the conductivity of pore water decreased gradually with the increase of water content, and the decrease range was 9.52%~55.51% when the bulk density was $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, and the decrease range was 9.72%~54.62% when the bulk density was $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. When the conductivity of pore water was constant, the volume conductivity increased with the increase of water content, the increase was 10.51%~124.75% when the bulk density was $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, and the increase was 10.76%~120.35% when the bulk density was $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Under the same water content, for the two bulk density cases, the measured pore water conductivity had a linear relationship with the volume conductivity. When the pore water conductivity was the same, the volume conductivity increased slightly with the decrease of the bulk density. When the water content was 24%, 25%, and 26%, compared with the volume conductivity when the bulk density was $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, the bulk conductivity increased by 1.95%, 2.47%, and 1.44% when the bulk density was $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, respectively. When the total infiltration water was limited, the change of soil water salinity with volumetric water content experienced four stages. With the continuous increase of volumetric water content during infiltration, the soil water salinity could be divided into three stages: salt-free dissolution, rapid increase of salt content and decrease of salt content, and the stage of decrease of both volumetric water content and salt content during water redistribution. At the end of the second stage, the amount of dissolved salt in each working condition reached the maximum value. When the bulk density was $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ and the average volumetric water were 20%, 22.5%, 25%, 28% and 31%, the maximum salt content were 3.54, 4.95, 7.17, 31.73 and 11.85 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, respectively. At the end of the fourth stage, the designed average volumetric moisture content was achieved. The pore water conductivity had a linear relationship with the volume conductivity, and its slope decreased with the increase of water content, which was a quadratic function of water content. The product of water content and pore water conductivity could be used to reflect the salt content of soil solution.

Keywords: volumetric conductivity; pore water conductivity; volumetric water content; soil bulk density

我国化肥生产量和施用量居世界第一,但肥料利用率仅30%左右,多年过量施肥使土壤养分富集、盐分增高,极易引起面源污染等环境问题。土壤盐分过高将影响作物生长发育,准确监测土壤盐分是确定灌溉施肥量的重要手段^[1]。土壤电导率能够间接反映田间养分或盐分含量,通过监测土壤电导率可以掌握土壤养分或盐分的运移和利用情况,对确定适宜施肥量、提高肥料利用率、减少面源污染具有重要意义。

国内外学者针对体积电导率的影响因素展开了大量研究。Corwin等^[2]建立了土壤质地、含水率、容重和有机质与土壤电导率的关系。张道明^[3]和孙宇瑞^[4]认为在一定含水率范围内,土壤电导率随含水率的增加而升高,当含水率更高时,因稀释效应使电导率降低或增加减缓。王全九等^[5]发现土壤电导率与含水率、含盐量及容重相关。刘广明等^[6]研究发现土壤含盐量低于 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤含水率对电导率具有显著影响。吕桂军等^[7]发现入渗过程中土壤一定深度处电导率与土壤水流经该处的时间呈幂函数递减关系。徐志闻等^[8]建立了土体电导率与含水率和含盐量之间的多元回归模型。已有研究表明,土壤体积电导率受含水率、土壤质地和结构及含盐量、盐分种类等多因素的综

合影响,需综合多方面因素确定土壤体积电导率与含盐量的关系^[9]。除了采用体积电导率估算盐分外,由于植物可吸收的是土壤孔隙水中的养分,孔隙水电导率能够更好地反映植物直接“感觉到”的盐度。使用土壤孔隙水电导率确定盐度可为判断盐分对作物生长的影响提供依据^[10]。孔隙水电导率需通过抽吸压缩或置换的方式才能提取土壤孔隙水进行测定^[11],过程复杂且无法连续监测。近年来,为满足自动监测孔隙水电导率的需求,根据传感器输出体积电导率以估计孔隙水电导率的数学模型飞速发展^[12-17]。如 Rhoades 等^[16]认为土壤电导率可采用固相、液相、固-液串联耦合通道三个并联通道的电导表示,并提出计算体积电导率和孔隙水电导率的模型;Malicki等^[14]研究发现,电导率和介电常数与土壤类型存在高度线性相关性,Hilhorst^[13]在此基础上提出了孔隙水电导率-体积电导率-介电常数的关系式。以上研究大多只是针对不同稳态含水率时的体积电导率开展大量研究,对含水率迅速变化情况下的体积电导率变化规律的研究则较少,同时研究体积电导率时很少考虑孔隙水电导率对其的影响。

农田灌溉期间,含水率和电导率均迅速变化;灌溉结束后,在土壤蒸发和根系吸水等作用下,土

壤水分仍然在不断变化,因此研究入渗过程及水分再分布过程中体积电导率的变化规律对探索土壤在整个灌溉周期内盐分的变化显得尤为重要。含水率的迅速变化导致直接用土壤体积电导率表征溶质的含量存在困难,孔隙水电导率反映了可被作物吸收利用的孔隙水中溶解养分的多少,因此在研究体积电导率变化规律的同时很有必要结合孔隙水电导率进行深入研究。本文通过研究不同容重土壤在不同入渗水量条件下体积电导率随含水率的变化,分析含水率持续变化过程中体积电导率和孔隙水电导率的变化规律及相互关系,研究成果可望为监测土壤溶质运移、确定施肥量提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

供试土壤取自石羊河试验站(102°52'E、37°52'N)农田0~40 cm土层。土壤粒径组成使用激光粒度分析仪(Mastersize3000型,马尔文,英国)测定,粒径为 $0\text{ mm} < d \leq 0.002\text{ mm}$, $0.002\text{ mm} < d \leq 0.05\text{ mm}$, $0.05\text{ mm} < d \leq 2\text{ mm}$ 的颗粒分别占16.5%、81.11%和2.39%(体积分数)。根据美国制分级标准^[18],供试土壤为粉砂壤土。土壤初始含盐量为0.32%,田间持水率为28%,饱和含水率为37%,初始含水率为1.75%。

1.2 试验装置及试验方案

试验前将风干土过2 mm筛,装入内径19.4 cm、高15 cm的PVC管。装土总高度6 cm,按照设计容重分两层装入,每层3 cm,装土时进行搅拌以防粗细颗粒自然筛分,层与层之间打毛、平整,装土过程中在PVC管中心处距底部3 cm处竖直埋设5TE传感器,试验装置如图1。装土结束后静置24 h,使土体获得均匀稳定的含水率。

为了分析土壤含水率不同时土壤水溶解的土壤盐量,通过加入不同入渗水量达到不同的平均土

壤含水率。根据土壤容重和设计土壤平均体积分含水率计算所需入渗水量。土壤平均体积分含水率设置为:20%、22.5%、25%、28%、31%,土壤容重设置为 $1.30\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.35\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。试验共有10个处理,每个处理设3次重复(详见表1),灌水后用塑料膜盖住防止水分蒸发。试验过程中不考虑温度对水分溶质运移的影响。5TE传感器在试验当天进行标定。

试验开始后,通过EM50数据采集器(Decagon公司,美国)^[19]连续监测和记录土壤含水率和电导率的变化过程,每1 min输出一次数据,灌水结束24 h后试验结束。

1.3 数据处理

5TE传感器可直接输出体积介电常数、温度值和体积电导率值,根据Topp等^[20]建立的含水率和介电常数的关系式,可将体积介电常数换算成体积分含水率,如式(1)所示。

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_b^3 - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_b^2 + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon_b - 5.3 \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中, θ 为体积分含水率(%), ε_b 为体积介电常数。

溶液或土壤的导电性每摄氏温度变化约2%,试验过程中土温变化范围16~20℃,由于5TE可自动修正温度,因此不考虑温度对水分溶质运移的影响。根据Hilhorst^[13]的线性模型估计孔隙水电导率 σ_p ,如式(2)所示。

$$\sigma_p = \frac{\varepsilon_p \sigma_b}{\varepsilon_b - \varepsilon_0} \quad (\theta > 0.1\text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}) \quad (2)$$

式中, σ_p 为孔隙水电导率($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), σ_b 为体积电导率($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), ε_0 为体积电导率 $\sigma_b = 0$ 时的介电常数,由土壤类型确定。根据试验土壤在 $\sigma_b = 0$ 时5TE传感器输出的介电常数值, ε_0 取6。 ε_p 是孔隙水的介电常数,可由式(3)计算获得:

$$\varepsilon_p = 80.3 - 0.37 \times (T_{\text{soil}} - 20) \quad (3)$$

式中, T_{soil} 为土壤温度(℃)。

用Microsoft Excel 2010进行数据整理,采用Excel 2010和OriginPro 9.0进行绘图。

2 结果与分析

2.1 入渗过程中含水率和电导率随时间的变化

将含水率开始变化的时刻设置为0时刻,土壤容重为 $1.35\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时土壤含水率和体积电导率随时间的变化过程分别如图2和图3所示。

在入渗过程中,含水率先急剧增大后逐渐减小,最后趋于平缓;体积电导率随着时间的增加先急

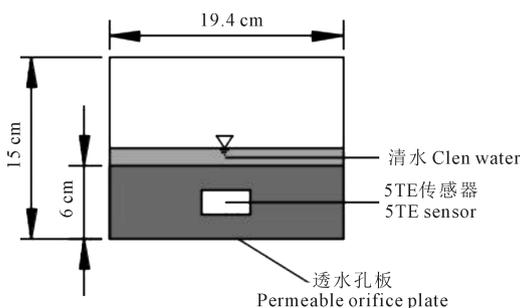


图1 试验装置图

Fig.1 Test device diagram

表1 试验方案设计

Table 1 Infiltration test scheme

处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均体积 含水率 Mean volumetric water content/%	总入渗水量 Total water infiltration/g	处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均体积 含水率 Mean volumetric water content/%	总入渗水量 Total water infiltration/g
T1	1.30	20	299.71	T6	1.35	20	311.24
T2		22.5	342.19	T7		22.5	355.35
T3		25	384.67	T8		25	399.46
T4		28	435.64	T9		28	452.39
T5		31	486.61	T10		31	505.33

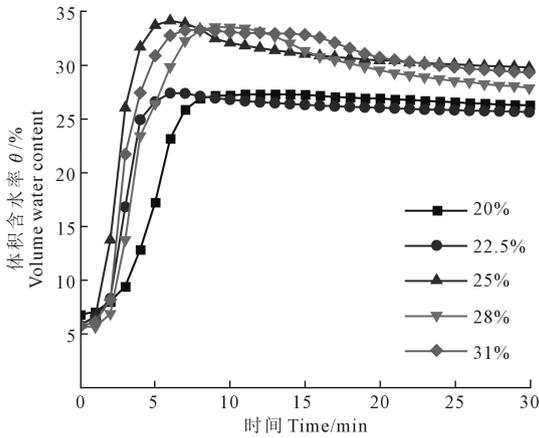
图2 容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时体积含水率随时间的变化过程

Fig.2 Change process of volumetric water content with time when the bulk density is $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

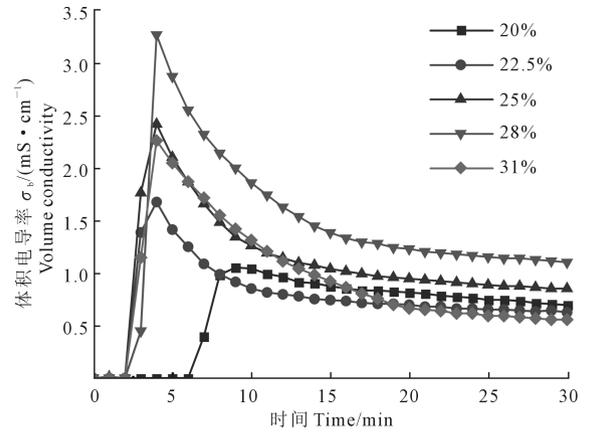
图3 容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时体积电导率随时间的变化过程

Fig.3 Change process of volume conductivity with time when the bulk density is $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

剧增大,然后逐渐减小最后趋于平稳,保持与含水率相同的变化规律。入渗初期,土壤含水率和体积电导率均增大,这是由于随着含水率的增大土壤溶出的离子增多,单位土体离子浓度增大进而导致体积电导率增大,然而由于土壤中养分含量是一定的,随着含水率的进一步增大,土壤溶液中离子浓度减小,体积电导率呈现出减小的趋势,故体积电导率开始减小的时间较含水率开始减小的时间略有提前。加水过程结束之后,土体的含水率逐渐趋于均匀,探头附近的水分逐渐向其他部位移动,因而含水率减小。由于一定土壤含水率所能容纳的离子总量是一定的,因而随着含水率的减小,单位体积水分溶出的离子总量减小,所以体积电导率减小。

2.2 体积电导率与孔隙水电导率的关系对含水率的响应

体积电导率包括土壤固相、气相和液相共同组合的电导率^[2],取决于孔隙水电导率和含水率,且主要受含水率的影响。当土壤含水率较低且土壤溶液盐浓度较高,或土壤含水率较高且土壤溶液盐浓度略低时,体积电导率可能相同^[21],不能正确反映盐度水平^[12,17]。目前普遍选择孔隙水电导率作

为衡量土壤养分含量的指标,代表了植物“感受到的”盐度,即反映了土壤能够提供给植物真实的养分含量,是土壤中所含溶质浓度的可靠指标^[22]。

土壤体积电导率取决于孔隙水电导率和含水率,只有在含水率为常数或孔隙水电导率、电导率和含水率之间的关系确定的情况下,才能确定孔隙水电导率^[23]。由于 EM50 直接输出的是体积电常数、温度值和体积电导率值,不能直接输出孔隙水电导率的值,因此需要对不同含水率下的孔隙水电导率值进行计算。图4是土壤容重为 1.35 、 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 入渗过程及土壤水分再分布过程中不同含水率情况下体积电导率与孔隙水电导率的关系图。可以看出,孔隙水电导率与体积电导率呈线性关系且斜率随含水率的增大而减小,即含水率越高,孔隙水电导率随体积电导率增大的速率越慢。体积电导率一定时,随着含水率的增加,孔隙水电导率逐渐减小, $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 处理中减幅为 $9.52\% \sim 55.51\%$,容重为 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时减幅为 $9.72\% \sim 54.62\%$;孔隙水电导率一定时,体积电导率随含水率的增加而增大,容重为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时增幅为 $10.51\% \sim 124.75\%$,容重为 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时增幅为 $10.76\% \sim 120.35\%$ 。

对图 4 中 2 种容重土壤不同含水率情况下体积电导率与孔隙水电导率的关系进行拟合,如表 2 所示。

从表 2 可以看出斜率 k 为含水率 θ 的函数,因此式(2)可以改写为:

$$\sigma_p = k(\theta)\sigma_b \quad (4)$$

式中, k 为斜率,是含水率 θ 的函数。

对于不同容重,将含水率 θ 和斜率 k 的关系拟合如下:

容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$:

$$k = 0.0531\theta^2 - 3.627\theta + 68.741 (\theta \geq 21\%)$$

$$R^2 = 0.9989 \quad (5)$$

容重 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$:

$$k = 0.0581\theta^2 - 3.8625\theta + 71.253 (\theta \geq 21\%)$$

$$R^2 = 0.9989 \quad (6)$$

式(5)和式(6)中, θ 为体积含水率(%)。

将式(5)和式(6)代入式(4)可得孔隙水电导率 σ_p 与体积含水率 θ 及体积电导率 σ_b 的关系式:

容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$:

$$\sigma_p = (0.0531\theta^2 - 3.627\theta + 68.741)\sigma_b \quad (7)$$

容重 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$:

$$\sigma_p = (0.0581\theta^2 - 3.8625\theta + 71.253)\sigma_b \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, σ_b 为体积电导率($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$); σ_p 为孔隙水电导率($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)。

2.3 体积电导率与孔隙水电导率的关系对土壤容重的响应

农田耕作过程中,不同位置或深度处土壤容重不同,即土壤孔隙度存在差异,导致单位体积土体内孔隙水含量和离子含量发生变化,进而使体积电导率发生改变。为了分析容重对土壤电导率的影响,图 5 给出了不同体积含水率和容重下体积电导率和孔隙水电导率的关系。可以看出,含水率相同

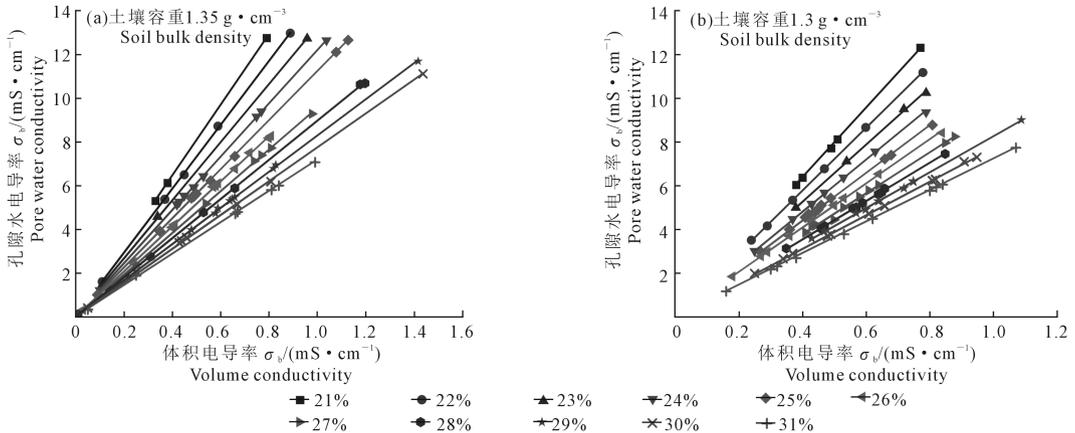


图 4 不同体积含水率 θ 下体积电导率 σ_b 和孔隙水电导率 σ_p 的关系

Fig.4 Relationship between volume conductivity and pore water conductivity at different volume water content conditions

表 2 体积电导率 (σ_b) 与孔隙水电导率 (σ_p) 的拟合公式/($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)

Table 2 Fitting formula of volume conductivity and pore water conductivity

体积含水率 Volumetric water content/%	土壤容重 Soli bulk density	
	$1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
21	$\sigma_p = 16.127\sigma_b$ $R^2 = 0.9999$	$\sigma_p = 15.902\sigma_b$ $R^2 = 0.9995$
22	$\sigma_p = 14.592\sigma_b$ $R^2 = 0.9997$	$\sigma_p = 14.356\sigma_b$ $R^2 = 0.9999$
23	$\sigma_p = 13.272\sigma_b$ $R^2 = 0.9999$	$\sigma_p = 13.072\sigma_b$ $R^2 = 0.9990$
24	$\sigma_p = 12.171\sigma_b$ $R^2 = 0.9999$	$\sigma_p = 11.932\sigma_b$ $R^2 = 0.9995$
25	$\sigma_p = 11.215\sigma_b$ $R^2 = 0.9998$	$\sigma_p = 10.919\sigma_b$ $R^2 = 0.9989$
26	$\sigma_p = 10.294\sigma_b$ $R^2 = 0.9996$	$\sigma_p = 10.108\sigma_b$ $R^2 = 0.9995$
27	$\sigma_p = 9.5344\sigma_b$ $R^2 = 0.9998$	$\sigma_p = 9.3646\sigma_b$ $R^2 = 0.9958$
28	$\sigma_p = 8.9450\sigma_b$ $R^2 = 0.9999$	$\sigma_p = 8.7703\sigma_b$ $R^2 = 0.9994$
29	$\sigma_p = 8.2585\sigma_b$ $R^2 = 0.9998$	$\sigma_p = 8.2284\sigma_b$ $R^2 = 0.9995$
30	$\sigma_p = 7.7267\sigma_b$ $R^2 = 0.9994$	$\sigma_p = 7.6821\sigma_b$ $R^2 = 0.9996$
31	$\sigma_p = 7.1754\sigma_b$ $R^2 = 0.9997$	$\sigma_p = 7.2159\sigma_b$ $R^2 = 0.9999$

时,同一容重的孔隙水电导率与土体电导率具有线性关系;在孔隙水电导率相同时,体积电导率随着容重的减小而略呈上升趋势,与容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 处理相比,容重 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 处理中含水率 24%、25%、26% 情况下的体积电导率分别提高 1.95%、2.47%、1.44%。

2.4 入渗及水分再分布过程中土壤溶液盐分含量变化

土壤孔隙水电导率与体积含水率的乘积 $\sigma_p \cdot \theta$ 类似于土壤水浓度与土壤水体积的乘积,相当于土壤中溶解出盐的总量。通过入渗及水分再分布过程中 $\sigma_p \cdot \theta$ 与 θ 的变化,分析土壤溶液盐分含量的变化规律,图 6 给出了容重为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时各试验工况入渗和水分再分布过程中 $\sigma_p \cdot \theta$ 与 θ 的变化关系图,总共历时 1 000 min,在 1 000 min 时均达到设计含水率。

从图 6 可以看出, $\sigma_p \cdot \theta$ 的变化分四个阶段:入

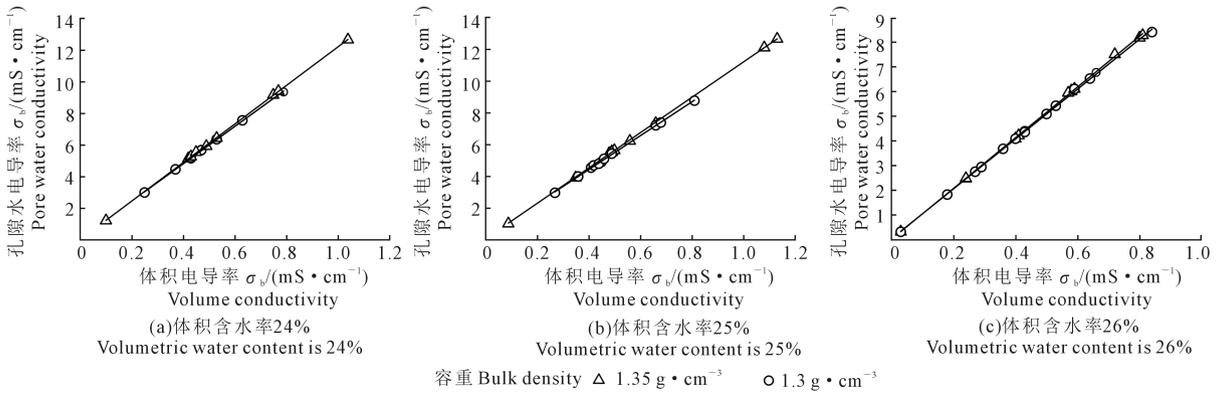
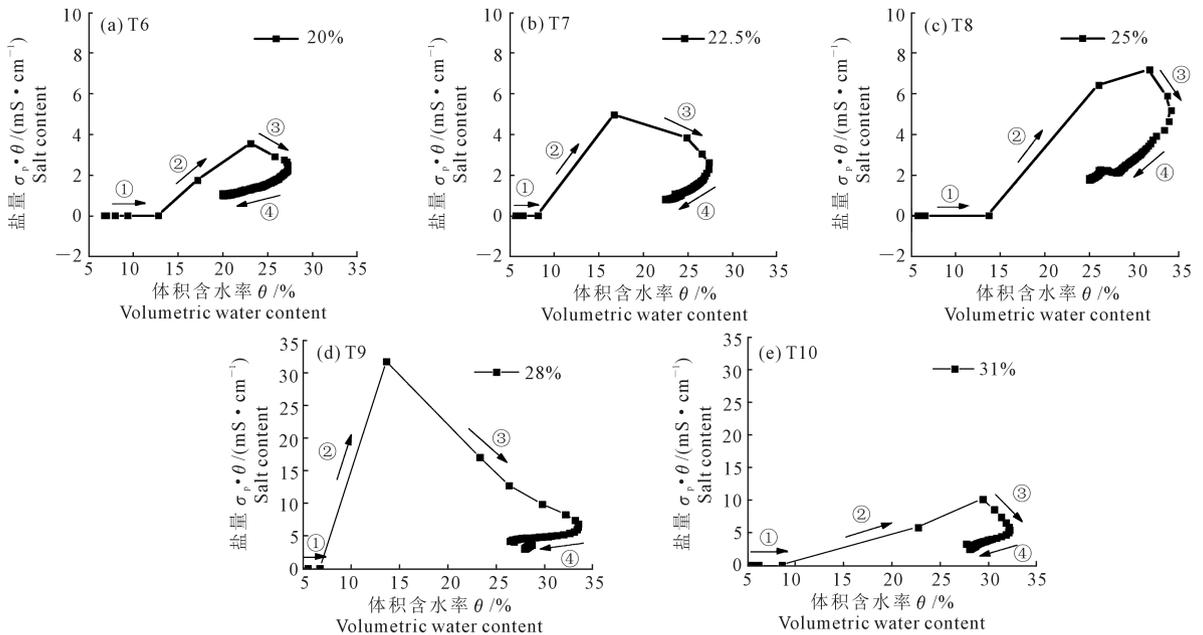


图5 不同容重时体积电导率随孔隙水电导率的变化情况

Fig.5 Variation of volume conductivity with pore water conductivity at different bulk density conditions



注:图中每个点代表1分钟的数据。

Note: Each point in the graph represents 1 minute of data.

图6 加入不同水量后入渗过程及水分再分布过程中盐的总量的变化

Fig.6 Changes of the total amount of salt in the infiltration and water redistribution after adding different amounts of water

渗过程为前3个阶段,土壤水分再分布为第4个阶段。阶段①:入渗开始后,含水率迅速增加,但盐量没有增加,此阶段历时2~3 min。阶段②:当含水率增加到一定程度时盐含量开始迅速增加,此阶段历时1~2 min;在此阶段末所溶出的盐量达到最大值,T6工况在含水率为23.1%时达到最大盐量 $3.54 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;T7工况在含水率为16.8%时达到最大盐量 $4.95 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;T8工况在含水率为31.7%时达到最大盐量 $7.17 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;T9工况在含水率为13.7%时达到最大盐量 $31.73 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;T10工况在含水率为29.4%时达到最大盐量 $11.85 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。阶段③:随着水分增加,总盐量逐渐减少,此阶段历时5~6 min。阶段④:随着含水率的减小,探头附近土壤溶解出盐的总量也在迅速减小。在此阶段末达到

设计的平均体积含水率时,T6、T7、T8、T9、T10工况溶出的盐量分别为 1.02 、 0.79 、 1.75 、 3.01 、 $2.88 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。整体而言,最后稳定时刻所溶出的盐量随着平均体积含水率的增加而增加。

3 讨论

3.1 入渗过程中含水率和电导率随时间的变化

入渗水量一定时,土壤含水率一般经过快速增加、逐渐降低、趋于稳定3个阶段,由于土壤从干燥到湿润,土壤水分溶解土壤中的盐分需要一定时间,土壤电导率的变化较含水率存在滞后。本研究所得入渗过程中含水率和电导率随时间变化规律与吕桂军^[24]研究结果基本相同,含水率和体积电导率均先急剧增大后逐渐减小,最后趋于平缓。其研

究表明土壤电导率随时间呈幂函数递减关系,这与本研究结果中电导率随时间的变化规律在逐渐减小阶段相同。

土壤电导率从土壤含水率开始增加后的第 3~5 min 开始变化,土壤含水率趋于稳定后的 3~5 min 内趋于稳定,在已有研究中电导率在初始时刻即是较大值^[24],没有将入渗过程中电导率迅速增大的过程呈现出来,原因可能是试验仪器所用探头、监测时间间隔设置不同造成的。因此在使用土壤电导率反映土壤含盐量时,需根据土壤含水率的变化趋势确定土壤电导率值,才能获得较为准确的土壤含盐量。

3.2 体积电导率与孔隙水电导率的关系对含水率及土壤容重的响应

本研究发现体积电导率一定时,孔隙水电导率随含水率的增加逐渐减小,这是由于土壤水分的增加产生稀释作用,使土壤溶液盐浓度降低,进而使得孔隙水电导率减小。

当孔隙水电导率一定时,体积电导率随含水率的增加而增大,与张道明^[3]和孙宇瑞^[4]的研究结果一致。因为含水率增加会使已溶解的离子浓度下降,要使孔隙水电导率不变,则一部分土壤颗粒上的盐分被溶解到土壤溶液中,达到新的平衡状态,使得总的溶解盐量增大,体积电导率随之增大。Rhoades 模型可以清楚地解释体积电导率随溶解的总盐量增加而增加的原因。该模型中,土颗粒表面的电导率 σ_s 和孔隙水电导率 σ_p 都是土壤体积电导率 σ_b 的重要组成部分,即 $\sigma_b = \sigma_p \theta F_g + \sigma_s$,其中 F_g 是传输系数,用于校正与流经土壤孔隙内复杂几何排列的水流相关的阻抗(弯曲度)。干土缺少游离态离子,体积电导率接近 0^[25]。5TE 探头在干燥土壤条件下测得 $\sigma_b = 0$,即 σ_s 可忽略不计,上述模型可简化为 $\sigma_b = \sigma_p \theta F_g$,其中 $\sigma_p \cdot \theta$ 代表孔隙水中离子总量,所以体积电导率会随总溶解盐量的增加而增加^[1]。

对于每一种容重情况,测得的孔隙水电导率与土体电导率同样具有线性关系,且在孔隙水电导率一致的情况下,土体电导率随着容重的增大呈减小趋势,与陈仁朋等^[26]对饱和砂土的研究结论相同。本文研究的是非饱和土壤,说明饱和与非饱和土壤孔隙水电导率与土体电导率对容重的响应相同。

3.3 土壤水分变化过程中土壤溶液盐分含量变化

含水率的变化对电导率测量和盐度评估的影响取决于盐损失是否随着含水率的变化而发生,在灌溉或降雨事件发生后,土壤中的盐分会随着水分

流失而被淋洗^[1,15-16,27]。在入渗过程中,电导率对含水率的变化相对敏感,不适宜用土壤电导率的测量值来评估土壤肥力,但可以采用含水率和孔隙水电导率的乘积间接反映土壤溶液盐分含量。

在入渗和水分再分布过程中, $\sigma_p \cdot \theta$ 的变化呈现出 4 个阶段,在入渗过程的阶段③中随着水分的继续增加,土壤水所溶解的离子浓度增大速率远低于含水率增大的速率,因此总盐量在逐渐减小。灌水停止后,在阶段④中,水分在重力作用下由上层向下层运动,最终土壤水分趋于均匀,由于探头测定的是一定范围土壤的水分含量,因此在水分逐渐趋于均匀时,探头附近的含水量会逐渐减小,探头附近土壤溶解出的盐量也迅速减小。在此阶段未达到设计的平均体积含水率时所溶出的盐量随着平均体积含水率的增加而增加,这是由于随着含水率增加,土壤孔隙逐渐被水分充满,所能容纳的盐量随之增加;其中 T4 工况溶出盐量最大,T5 工况溶出盐量次之,这是由于 T5 工况设计的平均体积含水率超过了田间持水率,因而水分的增加会对土壤水中的离子产生稀释作用,加上水分从上向下的运动过程会造成一定程度的淋溶;T2 工况溶出盐量略小于 T1 工况,这可能是由于探头与土壤的接触程度不同或者是仪器测量的误差造成的。将孔隙水电导率与体积含水率的乘积 $\sigma_p \cdot \theta$ 定义为土壤中溶解出盐的总量,其中孔隙水电导率代表了土壤溶液所溶出的离子浓度,体积含水率代表水量,因此该乘积实际上可以代表土壤中溶解出的盐的总量,但这和真正的盐量相差一个系数,因为孔隙水电导率和离子浓度需要转换,尚需进一步研究确定。

4 结 论

1) 在入渗过程中,含水率和体积电导率均先急剧增大后逐渐减小,最后趋于平缓。入渗初期,土壤含水率和电导率急剧增加,而后随着含水率进一步增大,土壤溶液中离子浓度减小,体积电导率呈现出减小的趋势,且较含水率开始减小的时间略有提前。

2) 当体积含水率一定时,孔隙水电导率与体积电导率呈线性关系且其斜率随着含水率的增加而减小,与含水率呈二次函数关系。当孔隙水电导率一定时,体积电导率随含水率的增加而增大。

3) 相同含水率下,对于不同容重处理,孔隙水电导率与土体电导率均呈线性关系,且在孔隙水电导率一致时,体积电导率随着容重的减小而呈上升趋势。

参考文献:

- [1] RHOADES J D, CHANDUVI F, LESCH S M, et al. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1999.
- [2] CORWIN D L, LESCH S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1): 11-43.
- [3] 张道明.土壤含水量对土壤导电性能的影响[J].土壤,1986,(1):15-18,22.
ZHANG D M. Effect of soil moisture content on soil conductivity[J]. Soils, 1986,(1): 15-18, 22.
- [4] 孙宇瑞.土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J].中国农业大学学报,2000,5(4):39-41.
SUN Y R. Experimental survey for the effects of soil water content and Soil salinity on Soil electrical conductivity[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 39-41.
- [5] 王全九,王文焰,张建丰.土壤电导与含水量和含盐量的关系及容重对其影响[J].西安理工大学学报,1992,(4):269-273,291.
WANG Q J, WANG W Y, ZHANG J F. Relation of soil electric conductivity and soil water to salinity content and its effect of the unit weight[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1992, (4): 269-273, 291.
- [6] 刘广明,杨劲松.土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J].土壤通报,2001,32(Z1):85-87.
LIU G M, YANG J S. Study on the correlation of soil salt content with electric conductivity and soil water content[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(Z1): 85-87.
- [7] 吕桂军,康绍忠,张富仓,等.盐渍化土壤不同入渗条件下水盐运动规律研究[J].人民黄河,2006,28(4):52-54.
LV G J, KANG S Z, ZHANG F C, et al. Study on water and salt law of motion of salinized Soil under different infiltration conditions[J]. Yellow River, 2006, 28(4): 52-54.
- [8] 徐志闻,刘亚斌,胡夏嵩,等.基于水分和原位电导率的西宁盆地盐渍土含盐量估算模型[J].农业工程学报,2019,35(5):148-154.
XU Z W, LIU Y B, HU X S, et al. Salt content estimation model of saline soil in Xining Basin based on water content and in-situ electrical conductivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 148-154.
- [9] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1/3): 45-70.
- [10] 林义成,丁能飞,傅庆林,等.土壤溶液电导率的测定及其相关因素的分析[J].浙江农业学报,2005,17(2):83-86.
LIN Y C, DING N F, FU Q L, et al. The measurement of electric conductivity in soil solution and analysis of its correlative factors[J]. ActaAgriculturaeZhejiangensis, 2005, 17(2): 83-86.
- [11] BAÑÓN S, ÁLVAREZ S, BAÑÓN D, et al. Assessment of soil salinity indexes using electrical conductivity sensors[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 285: e110171.
- [12] AMENTE G, BAKER J M, REECE C F. Estimation of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 1931-1939.
- [13] HILHORST M A. A pore water conductivity sensor[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 1922-1925.
- [14] MALICKI M A, WALCZAK R T. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity[J]. European Journal of Soil Science, 1999, 50(3): 505-514.
- [15] RHOADES J D, RAATS P A C, PRATHER R J. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 651-655.
- [16] RHOADES J D, MANTEGHI N A, SHOUSE P J, et al. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 433-439.
- [17] MUALEM Y, FRIEDMAN S P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil[J]. Water Resources Research, 1991, 27(10): 2771-2777.
- [18] 秦耀东.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2003:7-10.
QIN Y D. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 7-10.
- [19] DECAGON D.5TEwater content, EC and temperature sensors operator's manual.version 7[M].Pullman: Decagon Devices, Inc, 2008.
- [20] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582.
- [21] MCCANN I R, FRAJ M B, DAKHEEL A. Evaluation of the decagon® 5TE sensor as a tool for irrigation and salinity management in a sandy soil[C]//International Conference on Agricultural Engineering: New Technologies for Sustainable Agricultural Production and Food Security, 2014: 153-160.
- [22] ALJOUANI B, SÁNCHEZ-ESPIGARES J A, CAÑAMERAS N, et al. Transfer function and time series outlier analysis: modelling soil salinity in loamy sand soil by including the influences of irrigation management and soil temperature[J]. Irrigation and Drainage, 2018, 67(2): 282-294.
- [23] PERSSON M. Evaluating the linear dielectric constant-electrical conductivity model using time-domain reflectometry[J]. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(2): 269-277.
- [24] 吕桂军.盐碱土壤中根系分区交替灌溉条件下水盐运动研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2006.
LV G J. Study on water and salt movement in saline-alkali soil under alternate partial rootzoneirrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006.
- [25] 胡明鉴,蒋航海,崔翔,等.钙质砂电导率与相关性问题的初探[J].岩土力学,2017,38(S2):158-162.
HU M J, JIANG H H, CUI X, et al. Preliminary study of conductivity and correlation problems of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2): 158-162.
- [26] 陈仁朋,陈伟,王进学,等.饱和砂性土孔隙水电导率特性及测试技术[J].岩土工程学报,2010,32(5):780-783.
CHEN R P, CHEN W, WANG J X, et al. Electrical conductivity of pore water in saturated sand and its measurement technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 780-783.
- [27] SLAVICH P G. Determining ECA-depth profiles from electromagnetic induction measurements[J]. Soil Research, 1990, 28(3): 443-452.