

滨海盐渍土和棕壤咸水入渗特征分析

赵丽丽¹, 张振华¹, 李陆生^{1,2}

(1. 鲁东大学 地理与规划学院, 山东 烟台 264025; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于室内均匀土柱一维垂直积水入渗试验, 分析了入渗水矿化度对滨海盐渍土和棕壤入渗历时、入渗速率、累积入渗量、平均含水率增量的影响。结果表明, 相对淡水入渗, 咸水入渗显著增加土壤入渗能力, 盐渍土和棕壤入渗能力分别在矿化度为 12 g/L 和 3 g/L 时最强, 到达 25 cm 湿润锋处入渗历时分别比淡水少 32.5% 和 38.2%。同一矿化度条件下, 通常盐渍土入渗能力较棕壤强; 不同矿化度条件下, 盐渍土入渗能力差异较小。Philip 模型对短历时咸水入渗拟合精度较高, 偏差在 ±0.19% 范围内。不同矿化度水入渗, 盐渍土湿润剖面平均含水率增量为 38.22%~38.85%, 棕壤为 36.64%~37.82%。

关键词: 一维积水入渗; 盐渍土; 棕壤; 咸水; 入渗率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0044-05

中图分类号: S151.9⁺2, S152.7⁺1

Saline Water Infiltration Characteristics in Coastal Saline Soil and Brown Soil

ZHAO Li-li¹, ZHANG Zhen-hua¹, LI Lu-sheng^{1,2}

(1. College of Geography and Planning, Ludong University, Yantai, Shandong

264025, China; 2. College of Water Resources and Architecture Engineering,

Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The influences of mineralization degree on infiltration characteristics of coastal saline soil and brown soil were investigated by an indoor experiment of one-dimensional water ponding infiltration, using infiltration duration, infiltration rate, accumulative infiltration and average water content increment as indexes. Results show that compared with fresh water, saline water increased soil infiltration ability significantly. The abilities for the two soils reached the highest value as the mineralization were 12 and 3 g/L, respectively. As wetting front reached 25 cm, infiltration duration for saline water was less than that for fresh water by 32.5% and 38.2%. Under the same mineralization degree, the infiltration ability for saline soil was usually stronger than that for the brown soil. Under the different mineralization, however, the infiltration ability for the saline soil did not show a big difference. Philip model could accurately simulate the infiltration process for the short-duration salty water and the deviation was within the range of ±0.19%. With different mineralization degree levels water, the mean water content increment for the saline soil varied between 36.64% and 37.82%, while that for the brown soil ranged from 36.64% to 37.82%.

Keywords: one-dimensional ponding infiltration; saline soil; brown soil; saline water; infiltration rate

随着人口膨胀、城市化及工业化, 农业灌溉用水日益短缺。世界各国已将合理开发利用咸水资源作为弥补有限淡水资源的重要举措之一^[1-3]。中国西北、华北及沿海地带广泛分布咸水资源, 将其合理利用, 既缓解水资源供需矛盾, 又更新地下水资源并保护土壤水环境^[4-5]。

土壤水分入渗过程受水质影响, 水中溶质类型及含量影响水分密度、表面张力和黏滞度, 且其中的离子会与土壤胶体颗粒及各离子发生物理化学作用, 改变土壤孔隙及化学组成, 影响土壤入渗过程^[6]。在矿化度影响方面, 国内外学者关于淡水与微咸水入渗特性差异、矿化度对土壤入渗特征、水盐分布、离子迁移

收稿日期: 2012-12-12

修回日期: 2013-02-01

资助项目: 国家“863”计划课题“农田水肥联合调控技术与设备”(2011AA100504); 国家自然科学基金项目“曝气滴灌气水传输机制与滨海棉田土壤—植物系统响应”(41271236); 烟台市科技计划“设施农业水气耦合灌溉系统水力特征与关键设备”(2011065)

作者简介: 赵丽丽(1989—), 女(汉族), 山西省晋城市人, 硕士研究生, 主要从事区域水土资源高效利用研究。E-mail: sdytdxzl@163.com。

通信作者: 张振华(1971—), 男(汉族), 河北省藁城市人, 教授, 博士, 主要从事区域水土资源高效利用研究。E-mail: zhangzh71@163.com。

等影响及入渗过程模型拟合等方面的研究均取得了一定成果^[7-12],如较淡水入渗微咸水入渗能改变土壤结构,增加土壤入渗能力;随矿化度增加入渗能力先增大后减小,淡水范围内变化幅度大于微咸水;不同研究入渗能力突变值不同,吴忠东等^[11]认为是3 g/L,郭太龙等^[12]则认为是2 g/L。但目前的研究多集中在微咸水范围,仅戴继龙等^[13]分析咸水淋洗改良盐渍土时发现高矿化度咸水对土壤入渗特性有负面影响。

在影响咸水入渗过程方面,仍缺乏不同土壤类型咸水(尤其高矿化度水)入渗特征差异研究。王全九等^[14]研究了初始含水量对微咸水入渗特征影响,认为低含水量入渗土壤累积入渗量随含水量增加而增加,高含水量时表现不明显;苏莹等^[15],吴忠东等^[16]利用微咸水分析了入渗水量对土壤入渗特征的影响,得出入渗水量与湿润锋呈线性关系;吴忠东等^[17]、郭凯等^[18]探讨了相同矿化度不同钠吸附比咸水入渗过程,发现随钠吸附比升高,Na⁺浓度增大,入渗能力减小;毕远杰等^[7]对比了微咸水连续与间歇入渗土壤入渗特征,表明间歇入渗减渗,循环率不同,减渗效果略有差异。至于土壤类型不同导致咸水入渗差异的研究,仅杨艳等^[4]对微咸水入渗条件下碱土和盐土入渗特征进行了对比分析,表明碱土和盐土分别在0~3.2 g/L和0~2.5 g/L范围内,累积入渗量与矿化度呈正相关关系。因此,研究入渗水矿化度对不同土壤

类型入渗特征的影响有重要的环境和农学意义,对水资源危机的化解和农业可持续发展意义重大。

因田间试验各影响因素相互制约、空间变异性大,难以研究单因素对土壤入渗特征的影响。因此,本文采用室内一维垂直定水头积水入渗方法,评估了不同入渗水矿化度(0,3,6,9,12,24 g/L)对不同土壤类型(滨海盐渍土、棕壤)入渗特征的影响,旨在得出入渗水矿化度对不同土壤类型土壤持水性、水分运动规律的作用与影响,以期为田间高矿化度咸水合理利用及制定适宜的灌溉制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土样分别取自中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站和烟台农业科学研究院苹果园,取地表至60 cm深处土壤,将其均匀混合、风干、碾压、过筛(2 mm)备用。黄河三角洲滨海湿地供试土壤为盐渍土,烟台苹果园供试土壤为棕壤。2种土壤初始体积含水率分别为0.043,0.028 cm³/cm³,饱和体积含水率分别为0.401,0.455 cm³/cm³,饱和导水率分别为9.08×10⁻⁵,9.39×10⁻⁴ cm/s。供试土壤基本理化性质见表1。

灌溉用水包括淡水和矿化度分别为3,6,9,12,和24 g/L的咸水,淡水为去离子水,矿化度为0 g/L,咸水由NaCl和去离子水配制而成。

表1 供试土壤的基本理化特性

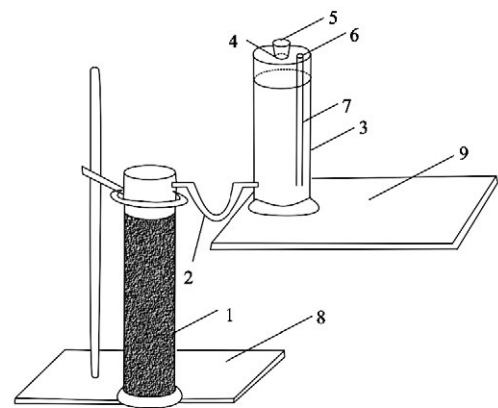
土壤类型	颗粒组成/%				土壤质地	容重/(g·cm ⁻³)	土壤孔隙度/%	含盐量/(g·kg ⁻¹)	pH值
	<0.002	0.002~0.02	0.02~0.2	0.2~2.0					
盐渍土	11.6	48.7	38.4	1.2	粉砂壤土	1.48	0.42	11.88	7.26
棕壤	16.5	49.6	32.8	1.2	粉砂黏壤土	1.43	0.46	0.73	6.15

1.2 试验装置

试验装置包括土柱和供水装置。土柱管为直径4.2 cm,高30 cm的有机玻璃管,供水装置是底面积42 cm²,高70 cm的马氏瓶,以保持1.5~2 cm恒定水头。土柱与马氏瓶外壁均标有刻度,用以观测入渗水量和湿润锋推进过程。试验装置如图1所示。

1.3 试验方法和观测内容

土壤颗粒组成:沉降法;土壤质地按国际制分类;土壤容重:环刀法;土粒密度:比重瓶法;土壤孔隙度:土壤容重与土粒密度之比;土壤含盐量:残渣烘干法;土壤pH值:酸度计测定;土壤体积含水率:时域反射仪法(TRIME-FM2);土壤饱和导水率:利用渗透仪以定水头法测定。



注:1. 试验土柱;2. 输水软管;3. 马氏瓶;4. 灌水口;5. 橡皮塞;6. 进气口;7. 进气管;8. 铁架台;9. 桌面。

图1 一维垂直积水入渗试验装置图

试验前在土柱底部填充滤纸和纱布,防止土样流失并保持透气性,将供试土壤充分混匀,按 1.3 g/cm^3 容重分层装土(每 5 cm 一层,共 5 层),土样顶部放好滤纸,防止表土受强烈冲击;试验开始后用马氏瓶供水,记录湿润锋与马氏瓶水位随时间的变化情况,湿润锋到达 25 cm 处结束试验。为保证试验结果可靠性,所设处理均做 3 次重复。

2 结果与分析

2.1 矿化度对入渗历时和入渗速率的影响

图 2 为 2 种土壤 5 种水质到达 25 cm 湿润锋所需时间。从图 2 可以看出,相同矿化度水入渗到达 25 cm 湿润锋,盐渍土和棕壤入渗历时差异显著;2 种土壤的 5 种不同矿化度处理,入渗历时均存在极显著差异($p < 0.01$),主要是由淡水与咸水入渗历时差异引起的。盐渍土咸水入渗到达 25 cm 湿润锋,入渗历时大小顺序依次为 $3 \text{ g/L} > 6 \text{ g/L} > 24 \text{ g/L} > 12 \text{ g/L}$, 12 g/L 咸水入渗历时比淡水少 32.5% ,除 3 g/L 与其他矿化度咸水入渗历时存在显著差异外,其他矿化度咸水之间差异不显著。棕壤咸水入渗到达 25 cm 湿润锋,入渗历时大小顺序依次为 $24 \text{ g/L} > 12 \text{ g/L} > 6 \text{ g/L} > 3 \text{ g/L}$, 3 g/L 咸水入渗历时比淡水少 38.02% , $3,6$ 与 24 g/L 咸水处理间,入渗历时均存在显著差异, 12 g/L 咸水入渗历时均值介于 6 g/L 和 24 g/L 之间,与其差异不显著。原因可能是少量盐分进入土壤,扩散双电子层向黏粒表面压缩,土壤颗粒排斥力降低,增强土壤胶体絮凝作用,增加入渗能力,入渗历时减少,但随矿化度升高, Na^+ 数量增加,土壤颗粒膨胀分散,土壤的透水透气性变差,导致入渗历时增加^[19],当矿化度增大超过某一临界值,对土

壤的破坏能力几乎不再增长。随矿化度增加盐渍土入渗历时差异较棕壤小,可能是因为盐渍土离子含量丰富,且粗颗粒含量较多,大孔隙多,入渗能力较强,入渗水矿化度增加对其影响相对较小。

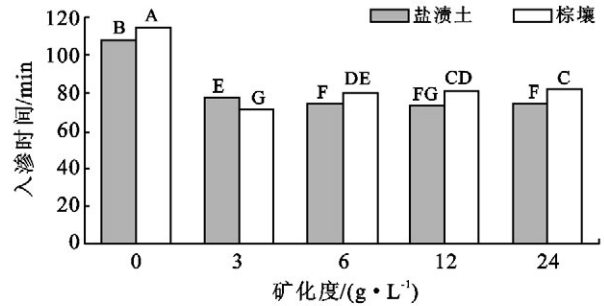


图 2 不同水质入渗达 25 cm 湿润锋所需时间

注:A,B,C,D,E,F,G 表征在 1% 显著水平下不同土壤不同水质入渗历时差异显著性,相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著。

入渗率是单位时间通过地表单位面积的入渗水量,反映土壤入渗能力。风干土积水入渗,起始阶段土壤入渗主要动力为基质势,随时间增长,重力势逐渐取代基质势,直至基质势为零,入渗趋于稳定。该规律如图 3 所示,不同矿化度入渗率随时间变化曲线均在短时间由陡峭变平缓,并逐渐趋于平稳。盐渍土淡水入渗率明显小于咸水,在 $3 \sim 24 \text{ g/L}$ 范围内,入渗率基本没有差异。棕壤咸水入渗率均大于淡水, $3 \sim 24 \text{ g/L}$ 范围内,随矿化度增加入渗速率略有减小。说明入渗水质改变土壤水分特性的同时也改变了土壤结构。由于装土时土壤颗粒并非绝对均匀分布,易出现上粗下细或上细下粗的分层现象,导致土壤入渗率短时间内波动较大,出现了不同矿化度之间的交叉现象,因此图 3 中存在异常点,但不影响整体分布规律。

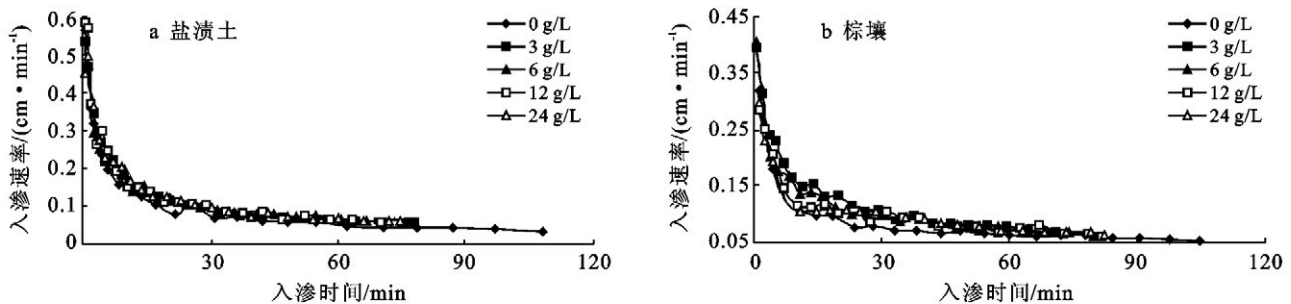


图 3 入渗速率随时间的变化

2.2 矿化度对累积入渗量的影响

累积入渗量是一定入渗时间通过地表单位面积的总水量,对于分析灌溉、降雨入渗等十分重要^[20]。从图 4 可看出,入渗初期累积入渗量随时间增加陡然增大,随时间延长,增长速度逐渐减慢。相同时间,盐

渍土咸水入渗累积入渗量明显大于淡水,咸水之间差异不大;到达 25 cm 湿润锋处,矿化度为 12 g/L 的累积入渗量最大,比淡水多 2.27% 。同一时间,棕壤 3 g/L 咸水入渗累积入渗量最大,淡水最小,矿化度大于 3 g/L 时累积入渗量随矿化度增加逐渐减小并趋

于平稳,入渗结束时 3 g/L 相对于淡水增渗率为 4.72%。为定量分析水质对入渗特征的影响,本文采用 Philip 入渗模型对试验资料进行拟合。对于均质土壤一维垂直入渗问题,Philip 认为入渗过程中累积入渗量与时间呈幂指数关系,具体模型如下:

$$I(t) = St^{0.5} + At \quad (1)$$

式中: I ——累积入渗量 (cm); S ——土壤吸渗率 ($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$); A ——稳定入渗率 (入渗历时足够长) (cm/min); t ——入渗时间 (min)。

本文根据试验所得资料,对累积入渗量与时间平方根进行回归分析,结果如表 2 所示。由拟合结果可得,Philip 入渗公式拟合效果很好,拟合系数 R^2 均大于 0.99。吸渗率作为土壤重要参数之一,影响导水率和毛管上升高度等导水参数^[21],棕壤 3 g/L 咸水入渗土壤吸渗率最大,3~24 g/L 范围内随矿化度增加而减小,减小幅度渐小;盐渍土 S 值大于棕壤,但变化幅度较小;稳渗率随矿化度增加的变化趋势与吸渗率相同,变化幅度很小,盐渍土小于棕壤。

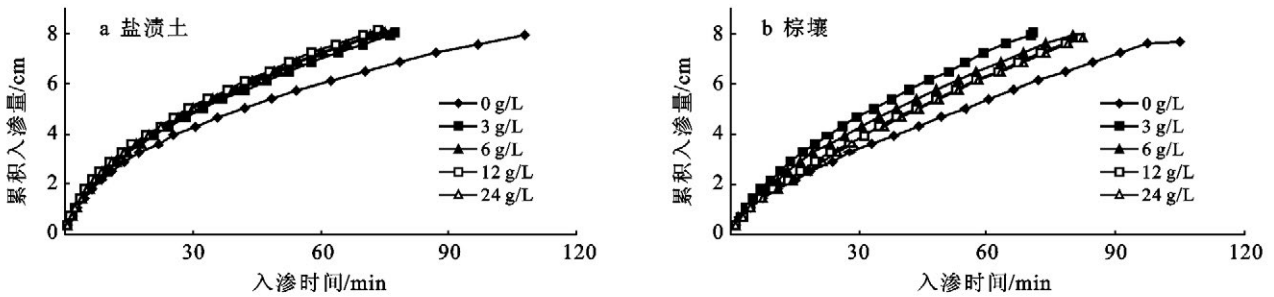


图 4 两种土壤累积入渗量随时间的变化

表 2 不同入渗水质下 $I-t$ 拟合结果

入渗水矿化度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)		0	3	6	12	24
盐渍土	$S(\text{cm}/\text{min}^{0.5})$	0.764 9	0.793 2	0.838 8	0.847 8	0.807 8
	$A(\text{cm}/\text{min})$	0.000 9	0.014 0	0.013 5	0.013 3	0.013 8
	R^2	0.997 8	0.997 7	0.996 6	0.997 5	0.996 3
棕壤	$S(\text{cm}/\text{min}^{0.5})$	0.430 1	0.615 3	0.560 1	0.429 4	0.395 3
	$A(\text{cm}/\text{min})$	0.034 2	0.052 6	0.049 6	0.041 5	0.038 2
	R^2	0.999 8	0.997 4	0.998 4	0.998 9	0.998 6

为进一步说明 Philip 模型描述咸水入渗过程的精确程度,将得到的参数 S 和 A 代入式(1),计算出累积入渗量,采用线性回归方程式(2)分析其与实测累积入渗量的关系:

$$I' = kI \quad (2)$$

式中: I' ——由推求参数计算的土壤累积入渗量 (cm);

k ——系数; I ——土壤累积入渗量实测值 (cm)。

拟合结果见表 3。据推求参数计算的土壤累积入渗量和实测值具有良好的一致性, R^2 均大于 0.98,计算值较实测值大都偏小,偏差在 $\pm 0.19\%$ 范围内,矿化度和土壤类型不同,拟合精度及偏差程度均存在一定差异。

表 3 土壤累积入渗量计算值和实测值的拟合结果

入渗水矿化度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)		0	3	6	12	24
盐渍土	k	0.999 2	0.999 1	0.998 9	0.999 7	0.998 8
	R^2	0.997 6	0.997 6	0.996 4	0.997 3	0.996 0
	偏差/%	-0.08	-0.09	-0.11	-0.03	-0.12
棕壤	k	0.999 7	0.999 7	0.999 4	1.001 9	0.999 9
	R^2	0.999 8	0.997 2	0.988 3	0.998 9	0.998 6
	偏差/%	-0.03	-0.03	-0.06	0.19	-0.01

2.3 矿化度对湿润区平均含水率的影响

对于一维垂直入渗,土壤湿润剖面平均含水率增量 $\Delta\theta$ 为累积入渗量 $I(t)$ 和湿润锋 $H(t)$ 的比值^[22]。Green—Ampt 假设湿润锋前为干燥区,土壤含水率为初始含水率 θ_i ,湿润区后为湿润区,土壤含水率为

饱和含水率 θ_s ,显然用土壤湿润剖面平均含水率 ($\Delta\theta + \theta_i$) 代替饱和含水率与实际情况相符^[23]。对不同矿化度定水头积水入渗试验分析(图 5)得出, $\Delta\theta$ 入渗开始阶段不断增大,30 min 后基本稳定且保持该状态,在入渗过程中其可看作常值,即不同矿化度入渗条件

下累计入渗量和湿润锋呈线性关系:

$$I(t) = \Delta\theta H(t) \quad (3)$$

式中: I ——累积入渗量(cm); $\Delta\theta$ ——平均含水率增量(%); H ——湿润锋推进深度(cm); t ——入渗时间(min)。

入渗 30 min 后,盐渍土和棕壤咸水入渗的 $\Delta\theta$ 明显大于淡水,在咸水范围内,盐渍土 $\Delta\theta$ 变化不明显,棕壤 $\Delta\theta$ 随矿化度增加稍减小。为对湿润剖面含水率

增量进行定量分析,据式(3)求算出不同矿化度入渗后 $\Delta\theta$ 值,结果如表 4 所示。盐渍土和棕壤不同矿化度水入渗累积入渗量和湿润锋均呈良好的线性关系, R^2 均大于 0.99;盐渍土 12 g/L 咸水入渗后 $\Delta\theta$ 最大,比淡水大 1.45%,棕壤最大值(3 g/L)比淡水大 3.22%;盐渍土较棕壤不同矿化度间 $\Delta\theta$ 差异较小,但相同矿化度盐渍土 $\Delta\theta$ 大于棕壤,其机理有待进一步研究。

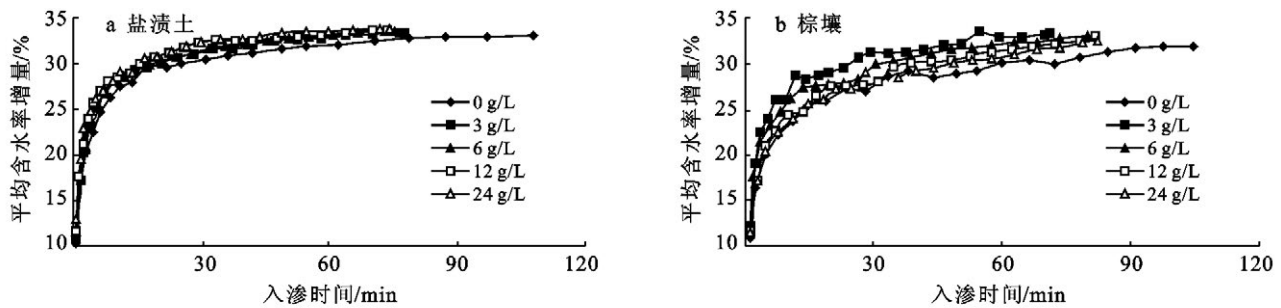


图 5 两种土壤湿润剖面平均含水率增量随时间的变化

表 4 土壤湿润剖面平均含水量增量

入渗水矿化度/(g·L ⁻¹)		0	3	6	12	24
盐渍土	$\Delta\theta/\%$	38.22	38.32	38.41	38.85	38.64
	R^2	0.998 0	0.993 6	0.997 8	0.998 8	0.996 6
棕壤	$\Delta\theta/\%$	36.64	37.82	37.79	37.54	36.95
	R^2	0.995 3	0.995 6	0.994 7	0.998 2	0.997 9

3 结论

(1) 相对于淡水入渗,盐渍土和棕壤咸水入渗能力显著增加。在咸水范围内,盐渍土 3 g/L 咸水入渗能力明显小于其他矿化度咸水,其他矿化度咸水入渗能力基本没有差异;棕壤入渗能力随矿化度增加显著减小,减小速度渐缓。表明土壤入渗过程由入渗水矿化度和 Na^+ 数量共同决定。同一矿化度,盐渍土入渗能力显著大于棕壤(3 g/L 除外),因盐渍土基底含盐量高,离子含量丰富,对 Na^+ 破坏土壤结构起缓冲作用,且其粗颗粒含量较多,土质偏沙性,大孔隙较多,入渗能力较强;棕壤受微咸水影响更大。

(2) 利用 Philip 入渗公式对短历时咸水入渗拟合精度较高,据拟合系数计算累积入渗量与实测值具有较好的一致性,偏差在 $\pm 0.19\%$ 范围内。盐渍土和棕壤咸水入渗,累积入渗量和湿润锋呈显著线性关系,其斜率即平均含水率增量 $\Delta\theta$,盐渍土 $\Delta\theta$ 值为 38.22%~38.85%,棕壤为 36.64%~37.82%。

(3) 本文为定量描述矿化度和土壤类型对土壤入渗特征的影响提供了参考,在将来研究中需增加不同矿化度处理,延长入渗时间,同时针对土壤性质(如土壤质地、机械组成、土壤结构、土壤含盐量等)增加

土壤样本梯度变化和数量,建立不同矿化度和土壤类型与入渗过程中水力参数的预测模型,最终为提高咸水利用效率提供理论基础。

[参考文献]

- [1] 吴忠东,王全九.微咸水连续灌溉对冬小麦产量和土壤理化性质的影响[J].农业机械学报,2010,41(9):36-43.
- [2] Chauhan C P S, Singh R B, Gupta S K. Supplemental irrigation of wheat with saline water[J]. Agricultural Water Management, 2008,95(3):253-258.
- [3] Malash N, Flowers T J, Ragab R. Effect of irrigation systems and water management practices using saline water and non-saline water on tomato production[J]. Agricultural Water Management, 2005,78(1/2):25-38.
- [4] 杨艳,王全九.微咸水入渗条件下碱土和盐土水盐运移特征分析[J].水土保持学报,2008,22(1):13-19.
- [5] 赵耕毛,刘兆普,张博,等.滨海盐渍区海水养殖废水利用与减蒸抑盐措施研究[J].土壤,2010,42(2):292-296.
- [6] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:128-129.
- [7] 毕远杰,王全九,雪静.淡水与微咸水入渗特性对比分析[J].农业机械学报,2010,41(7):70-75.
- [8] 刘春成,李毅,郭丽俊,等.微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2011,27(8):39-45.

(下转第 117 页)

的时间也越晚。表层土体的蓄水使得深层渗漏量少,因此水量猛增的幅度也较小。160 cm 土层的土壤含水率只从 16.27% 增至 18.95%,增幅远小于表土。降雨结束后,其土壤含水率一直保持稳定,没有下降的趋势,这表明在整个降雨过程中,深层土层没有达到饱和状态。

(5) 对不同树种同一土层含水率比较可以看出,五角枫各层的含水率最高,油松的最低,其大小依次为五角枫>空地>侧柏>油松。主要是油松侧柏的土壤质地疏松,土壤容重较小,水分容易下渗,因此土壤含水率较低。

[参 考 文 献]

- [1] 耿佳,于法展,杨盼盼,等. 苏北山丘区典型性次生林下土壤蓄水能力分析[J]. 水土保持研究,2012,19(1):184-191.
- [2] 常允新,朱学顺,宋长斌,等. 煤矸石的危害与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报,2001,12(2):39-43.
- [3] Shu Wensheng, Ye Zhihong, Lan Chongyu, et al. Acidification of lead-zinc mine tailings and its effected on heavy metal mobility [J]. Environment International, 2001,26(5/6):389-394.
- [4] 周建民,党志,司徒粤,等. 大宝山矿区周围土壤重金属污染分布特征研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(6):1172-1176.
- [5] 秦俊. 三里洞煤矸石废弃地景观规划[J]. 中国农学通报,2010,26(10):303-308.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2005.
- [7] 王鹏程. 三峡库区森林植被水源涵养功能研究[D]. 北京:中国林业科学院,2007.
- [8] 中国可持续发展林业战略研究项目组. 中国可持续发展林业战略研究总论[M]. 北京:中国林业出版社,2002.
- [9] 陈步峰,林明献,周光益,等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统的水文生态效应[J]. 生态学报,2000,20(3):423-429.
- [10] 邹旭恺,张强,叶殿秀. 长江三峡库区连阴雨的气候特征分析[J]. 灾害学,2005,20(1):84-89.
- [11] 耿佳,于法展,杨盼盼,等. 苏北山丘典型性次生林下土壤蓄水能力分析[J]. 水土保持研究,2012,19(1):184-191.
- [12] 柴世伟,温琰茂,张亚雷,等. 地积累指数法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 同济大学学报,2006,34(12):1657-1661.
- [13] 何其华,何水华,包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报,2003,21(2):149-156.
- [14] Huisman J A, Sperl C, Bouten W, et al. Soil water content measurements at different scales: Accuracy of time domain reflect tometry and ground-penetrating radar[J]. Journal of Hydrology, 2001,245(3):48-581.
- [15] Campbell S G, Anderson Y R. Evaluation of simple transmission line oscillators for soil moisture measurement[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1998,20:31-441.
- [16] 田积莹. 黄土地区土壤的物理性质与黄土成因的关系[J]. 中国科学院西北水保所集刊,1987(5):1-12.
- [17] 蒋定生,黄国俊,谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. 水土保持通报,1984,4(4):7-9.
- [18] 史宇. 北京山区主要优势树种森林生态系统生态水文过程分析[D]. 北京林业大学,2012.
- [19] 史晓楠,王全九,巨龙. 微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green—Ampt 模型参数的对比分析[J]. 土壤学报,2007,44(2):360-363.
- [10] 吴忠东,王全九. 利用一维代数模型分析微咸水入渗特征[J]. 农业工程学报,2007,23(6):21-26.
- [11] 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):64-75.
- [12] 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[J]. 农业工程学报,2005,21(S):84-87.
- [13] 戴继航,张金龙,李婧男,等. 咸水淋洗改良滨海盐渍土的潜力研究[J]. 水土保持学报,2011,25(3):250-253.
- [14] 王全九,叶海燕,史晓楠,等. 土壤初始含水量对微咸水入渗特征影响[J]. 水土保持学报,2004,18(1):51-53.
- [15] 苏莹,王全九,叶海燕,等. 微咸水不同入渗水量土壤水盐运移特征研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(4):43-48.
- [16] 吴忠东,王全九. 微咸水入渗水量对土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(11):67-71.
- [17] 吴忠东,王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(1):231-236.
- [18] 郭凯,陈丽娜,张秀梅,等. 不同钠吸附比的咸水结冰融水入渗后滨海盐土的水盐分布[J]. 中国生态农业学报,2011,19(3):506-510.
- [19] 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.
- [20] 张振华,谢恒星,刘继龙,等. 气相阻力与土壤容重对一维垂直入渗影响的定量分析[J]. 水土保持学报,2005,19(4):36-39.
- [21] 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.
- [22] 张振华,谢恒星,刘继龙,等. 基于图形特征的 Green—Ampt 入渗模型关键参数 S_f 和 K_s 的简化求解[J]. 土壤学报,2006,43(2):203-208.
- [23] 马娟娟,孙西欢,郭向红. 基于 Green—Ampt 模型的变水头积水入渗模型建立及其参数求解[J]. 水利学报,2010,41(1):61-67.

(上接第 48 页)