

入渗水水质对土壤导水特性影响的试验研究

张俐^{1,2}, 余冬立^{1,2}, 傅瑜³, 章二子⁴

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 3. 溧阳市国土资源局, 江苏 溧阳 213300; 4. 江苏省江宁区水利局, 南京 210098)

摘要: 为探究不同入渗水水质对土壤导水特性的影响, 采用圆盘负压入渗法进行试验研究, 选取两种水质(蒸馏水和自来水)对黄壤和红壤进行4个压力水头(0, -3, -6, -9 cm)下的圆盘入渗试验。结果表明, 随着入渗水电导率的增大, 土壤入渗率、吸渗率及导水率均随之增大, 且红壤在不同电导率的入渗水作用下土壤吸渗率的变化差异显著($P < 0.05$)。在低水头压力下, 两种水质入渗条件下测得的土壤导水率差异显著($P < 0.05$); 在高水头压力下, 两种水质入渗下测得土壤导水率差异不显著, 表明入渗水水质对土壤导水率的影响主要发生在低压力水头下即在细孔隙下的导水特性上。两种土壤的大孔隙与中等孔隙对水流贡献率随入渗水电导率的增大而增大, 而小孔隙对水流贡献率随入渗水电导率的增大而减小, 入渗水水质对红壤土不同级别孔隙水流贡献率的影响显著($P < 0.05$)。研究分析相关参数的变化有利于探讨野外试验时入渗水水质对试验结果的影响, 对于正确认识农田水文过程、开发利用劣质水资源、提高农业灌溉水质和灌水效率等具有重要意义。

关键词: 圆盘入渗仪; 土壤导水特性; 水质; 负水头

中图分类号: S152.7⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0064-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.011

Experimental Study of Soil Hydraulic Characteristics Influenced by Infiltration Water Quality

ZHANG Li^{1,2}, SHE Dongli^{1,2}, FU Yu³, ZHANG Erzi⁴

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098; 3. Liyang Bureau of Land and Resources, Liyang, Jiangsu 213300; 4. Jiangning Water Resources Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210098)

Abstract: In order to investigate the influence of infiltration water quality on soil hydraulic characteristics, two types of water (distilled and tap water) were selected to carry out in four pressure heads (0, -3, -6, -9 cm) on yellow loam and red loam by using a disc infiltrometer. The results showed that infiltration rate, hydraulic conductivity and sorptivity increased with the increase of the water electrical conductivity, and the soil sorptivity in red loam differed significantly under different conductivity of water ($P < 0.05$). Under the low head pressure, the soil hydraulic conductivity was significantly different between two types of water ($P < 0.05$). By contract, the difference of soil hydraulic conductivity between two types of water was not significant under high head pressure. The influence of water quality on (fine pore) soil hydraulic conductivity was mainly under the low pressure head. The contribution of macropores and medium porosity in the yellow and red loam soils to water flow increased with the increase of the conductivity of water. However, the contribution of the small pores to the flow decreased with the increase of the conductivity of water. Different types of water had significant influence on the contribution rate of different grades of porosity to water flow in red loam ($P < 0.05$). Study of the influence of water quality on soil hydraulic characteristics was beneficial for discussing the influence of water quality on the experimental results, correctly understanding the soil hydrological processes, developing and utilizing low quality water resources, and improving irrigation quality and irrigation efficiency.

Keywords: disc infiltrometer; soil infiltration properties; water quality; negative water pressure head

收稿日期: 2017-03-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471180); 江苏省国土资源科技项目(KJXM2016009); 江苏省水利科技项目(2016053)

第一作者: 张俐(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事农田水土过程研究。E-mail: 1229767533@qq.com

通信作者: 余冬立(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农田水土过程与侵蚀控制研究。E-mail: shedongli@hhu.edu.cn

土壤导水特性是研究农田水文过程的基本输入参数。导水特性受降雨特性等外在因素和土壤内在特性等共同作用,而入渗水水质对导水过程的影响逐步引起学者关注。入渗水水质对于土壤导水性能的影响表现在土壤化学组份和孔隙组成会因水中离子与土壤胶体颗粒发生物理化学作用而发生改变,进而影响土壤水分入渗过程^[1]。杨艳等^[2]研究在不同灌溉水质条件下土壤物理特性变化,试验表明碱土在不同矿化度微咸水入渗下剖面含水量和含盐量均有较大差异;肖娟等^[3]研究在不同负水头供水条件下的水盐分布和湿润体运移情况,试验表明湿润体的最大水平和垂直湿润距离及累积入渗量均随灌溉水盐分浓度的增加而增加;郭太龙等^[4]采用土柱进行微咸水一维积水入渗试验,研究表明土壤入渗能力随入渗水矿化度的减少而减弱;吴忠东等^[5]通过室内一维积水垂直入渗试验研究了灌溉水对土壤理化性质、离子迁移及入渗特性的影响,发现由于土壤结构会在微咸水入渗后发生改变,土壤的导水和持水能力会增强;唐胜强等^[6]针对微咸水和去离子水进行降水头积水入渗试验,研究结果表明土壤盐分增加使土壤入渗能力增加,但入渗能力的衰减速度略高于淡水入渗处理。由此可见,不同入渗水水质对于土壤导水特性确有一定的影响。由于野外环境条件限制,试验人员在野外进行土壤导水特性测定时多因地制宜就地取水,但试验用水的水质对试验结果产生影响如何还需要进一步研究,特别是讨论分析试验结果时需考虑这一因素的影响。因此,探讨入渗水水质对土壤导水特性的影响对于正确认识农田水文过程,开发利用劣质水资源,提高农业灌溉质量和灌水效率等均具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试供土壤及水的种类

试验于2016年5—6月在河海大学节水园区内进行。试验土壤分别为黄壤和红壤。黄壤取自河海大学节水园区节水与农业生态试验场(31°86'N, 118°60'E)。试验区为亚热带气候,年平均降水量为1 021.3 mm,年均蒸发量为900 mm,年均气温15.7℃,最热月平均温度28.1℃,年均日照时数2 212.8 h,年无霜期237 d。红壤取自中国科学院土壤研究所江西红壤试验站,年平均气温16~20℃,≥10℃积温5 000~6 500℃,年降水量800~2 000 mm,干燥度<1.0,无霜期225~350 d。黄壤和红壤土壤容重均为1.3 g/cm³,取样深度均为表层0—20 cm。黄壤砂粒(0.25~0.05 mm)、粉砂粒(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)含量分别为10.8%,43.2%和46.0%,而红壤颗粒组成相应含量分别为21.3%,31.6%和47.1%。黄壤CEC 12.94 cmol/kg,全氮含量0.36 g/kg,

红壤CEC 11.33 cmol/kg,全氮含量0.47 g/kg。试验分别采用蒸馏水和自来水进行圆盘入渗试验,蒸馏水pH 7.2,自来水pH 6.8,蒸馏水电导率4.6 μS/cm,自来水电导率177.3 μS/cm。

1.2 试验方法与设备

圆盘入渗仪组成包括入渗盘、储水管和恒压管。入渗盘与储水管固定连接,负水头通过橡胶管连接恒压管来控制(图1)。本试验采用入渗圆盘直径为10 cm,储水管直径为3.5 cm,高度为100 cm。试验土壤风干后经碾压和粉碎过2 mm筛,分成等量5份。按1.3 g/cm³的容重将土装入土箱(30 cm×30 cm×30 cm),装填时按照5 cm一层分次装入同时压实,使各层土壤分布均匀。在测定时于圆盘盘底粘一层细纱布,细纱布防止沙子进入圆盘的孔隙中。试验选取4个不同负压(-9,-6,-3,0 cm)进行圆盘入渗试验,从低到高依次进行。在土壤吸渗开始每10 s读1次数,读取3 min,然后每隔30 s读取1次数,读取5 min,从第9 min开始每隔1 min读1次数,直至连续相等的时间内储水管下降高度相等。土壤入渗达到稳定后,关上阀门,迅速移开圆盘入渗仪,将表层细沙铲去,取表层土壤约30 g,用烘干法(105℃)测定土壤含水率。

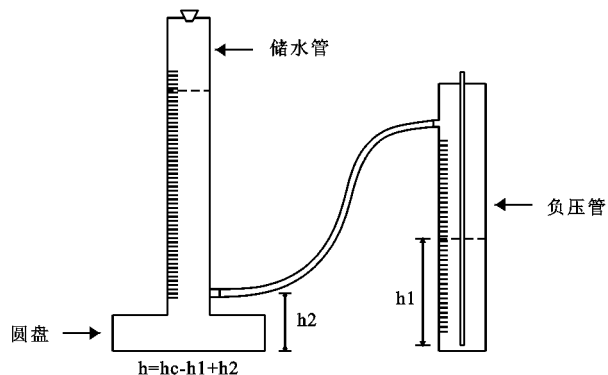


图1 圆盘入渗仪示意

1.3 数据处理与计算方法

土壤依靠毛管力吸收或释放液体能力的量度为土壤吸渗率。圆盘入渗过程为三维入渗,但在试验初期,土壤毛管力起主导作用,其重力和扩散作用可忽略不计,简化为一维入渗,因而可用 Philip 公式来确定圆盘入渗仪测定下的土壤吸渗率^[7-8]。

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

式中: I 为一定供水压力下的累积入渗量(cm); t 为入渗时间(s); S 为一定供水压力下的吸渗率(cm/s^{0.5})。由于 Philip 公式适用于试验初期,且试验水头从-9 cm逐步增加至0 cm,因此以试验初期-9 cm水头下的入渗试验为例,利用前4 min数据对累积入渗量 I 随时间 t 变化关系拟合出土壤吸渗率 S 。

利用非线性回归分析方法^[9]计算导水率 K 和土壤孔隙大小分布的 Gardner α 常数,拟合方程为^[10]:

$$I_h = K_s e^{\alpha h} + \frac{4K_s e^{\alpha h}}{\pi R \alpha} \quad (2)$$

式中: I_h 表示在压力水头为 h (cm) 下的稳定入渗率 (cm/min); R 表示圆盘入渗半径 (cm); α 表示 Gardner 常数 (1/cm); K_s 表示土壤饱和导水率 (cm/min)。将拟合得到的饱和导水率 K_s 和 α 代入 Gardner 指数方程:

$$K(h) = K_s e^{\alpha h} \quad (3)$$

可以求出 0, -3, -6, -9 cm 水头下的导水率, 各负压下导水率值分别用 K_s 、 K_3 、 K_6 、 K_9 表示。

在毛管水理论中提到在土壤水运动过程中, 半径分别大于 0.5, 0.25, 0.1 mm 中的水流是由 -3, -6, -9 cm 水头下的入渗排除。因此, 将孔隙分为 4 个等级: 孔隙半径 > 0.5 mm 为大孔隙, 0.25 ~ 0.5 mm 为中等孔隙 1, 0.1 ~ 0.25 mm 为中等孔隙 2, < 0.1 mm 为小孔隙^[11]。各级别孔隙的导水能力由不同级别孔隙对水流的贡献率来表明, 本文记为 φ (%)^[12]:

$$\varphi(\%) = \frac{K(h_f) - K(h_{f-1})}{K_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $f=1, 2, 3, \dots, n$; n 表示测量次序的数值; h 表示压力水头 (cm); $K(h_f)$ 、 $K(h_{f-1})$ 表示连续 2 个压力水头下获得的导水率 (cm/min); K_s 表示土壤饱和导水率 (cm/min)。

数据处理采用 Excel 和 SPSS 进行数据整理和

数据拟合计算。

2 结果与分析

2.1 不同类型入渗水对土壤入渗率的影响

入渗率反映土壤入渗性能, 入渗开始时, 土壤基质势较大, 入渗速率大; 随入渗时间增加, 土壤基质势降低, 土壤入渗速率逐渐降低, 最终趋于稳定, 土壤稳定入渗率是反映土壤入渗能力的重要参数。表 1 为两种水质入渗条件下土壤的平均入渗率与稳定入渗率随压力水头的变化。黄壤和红壤在两种入渗水入渗条件下土壤的稳定入渗率均随着压力水头的增加而增大, 水头为 0 cm 时稳定入渗率最大。这是因为在负压水头达到 -9 cm 时, 土水接触面上的水分受到垂直向上的大气压力差最大, 水分下渗受到阻碍最大, 只有在较小的土壤孔隙中由于受到较大的土壤吸力, 可以克服大气压力差向下运动; 随着负压水头逐渐由 -9 cm 变化至 0 cm, 入渗水头压力增大使水分受到的气压差逐渐减小, 较大土壤孔隙也可通过水流, 入渗率随之增大。在压力水头分别为 -9, -6, -3, 0 cm 时, 两种土壤初始入渗速率 (开始 3 min 和 8 min 平均入渗率) 和稳定入渗率均随入渗水的电导率增大而增大, 刘芳芳等^[13]、李莎等^[14]研究在点源入渗条件下水质对于盐碱土入渗性能的影响也得出土壤入渗率随灌溉水矿化度的增大而增大, 即微咸水灌溉中的盐分可以促进土壤水分入渗。

表 1 不同类型入渗水入渗下的土壤入渗特性

入渗水	水头/cm	黄壤			红壤		
		开始前 3 min	开始前 8 min	稳定入渗率/ (cm · min ⁻¹)	开始前 3 min	开始前 8 min	稳定入渗率/ (cm · min ⁻¹)
		平均入渗率/ (cm · min ⁻¹)	平均入渗率/ (cm · min ⁻¹)		平均入渗率/ (cm · min ⁻¹)	平均入渗率/ (cm · min ⁻¹)	
蒸馏水	-9	0.221	0.162	0.074	0.931	0.790	0.299
	-6	0.110	0.102	0.090	0.423	0.384	0.317
	-3	0.127	0.125	0.137	0.420	0.416	0.369
	0	0.214	0.211	0.207	0.635	0.595	0.520
	-9	0.319	0.288	0.113	0.988	0.718	0.300
自来水	-6	0.192	0.187	0.160	0.314	0.296	0.321
	-3	0.207	0.184	0.217	0.468	0.448	0.418
	0	0.288	0.279	0.306	0.649	0.613	0.594

图 2 为以 -9 cm 水头下的入渗试验实测数据, 采用 Philip 公式拟合前 4 min 累积入渗量 I 随时间 t 变化关系得出的土壤吸渗率 S 随入渗水的变化。黄壤吸渗率拟合的相关系数 R^2 为 0.87 ~ 0.91, 红壤吸渗率拟合的 R^2 为 0.90 ~ 0.92, 两种土壤拟合精度均较高, 表明 Philip 公式对本试验土壤水分入渗过程的适用性较好。两种土壤吸渗率均随入渗水电导率增大而增大。红壤在不同电导率的入渗水作用下土壤吸渗率变化差异显著 ($P < 0.05$), 黄壤在不同电导率的入渗水作用下土壤吸渗率变化无显著差异 ($P > 0.05$), 两种土壤吸渗率的差异可能由于土壤质地差

异引起, 黄壤砂粒 (0.25 ~ 0.05 mm) 占 10.8%, 红壤则占 21.34%, 相对而言, 黄壤的孔隙数量可能相对较少, 孔隙结构较差, 因此入渗水中盐分对入渗的影响较红壤土较小, 从而黄壤吸渗率变化无显著差异。

2.2 不同类型入渗水对土壤导水率的影响

土壤入渗率增大说明土壤的总体孔隙结构可能得到改善, 为确定何种大小孔隙的变化对入渗过程产生了主要的影响, 研究分析大、中、小 3 种孔隙对入渗过程影响的差异性。土壤导水率 K 、孔隙大小分布 Gardner α 常数等是反映土壤入渗能力的重要参数^[15], 其与土壤特性关系密不可分, 但同时也受入渗

水的性质影响^[16]。两种土壤导水率均随压力水头降低而减小,且在 0 cm 水头下土壤导水率变异系数 C_v 均为在 -9 cm 水头下的 2~3 倍,这是由于压力水头从 0 cm 降低至 -9 cm,对土壤导水率起决定作用的土壤孔隙尺寸逐渐减小,同时由于大孔隙变异程度大于小孔隙,孔隙越小分布越均匀,因此随着压力水头降低,土壤导水率变异程度也因孔隙尺寸的减小而减小。

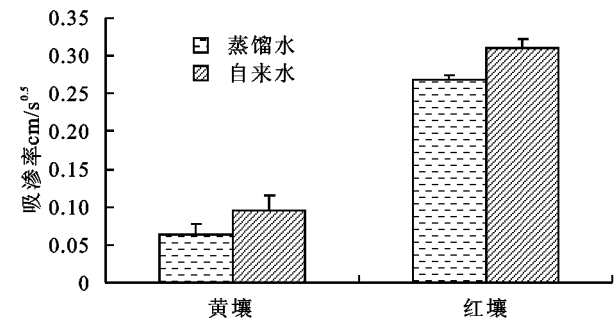


图 2 不同类型入渗水入渗下的土壤吸渗率值

为研究入渗水水质对土壤导水率的影响,对不同入渗水入渗条件下土壤导水率 K 和 Gardner α 进行了方差分析。从图 3 可以看出,对于黄壤和红壤,导水率 K_s 、 K_3 、 K_6 、 K_9 均随入渗水电导率增大而增大,说明入渗水盐分提高土壤导水率^[17],这一结果同样由入渗水中的盐分积累在土壤中改善土壤透水性所产生。在自来水入渗下黄壤导水率 K_3 、 K_6 、 K_9 均显

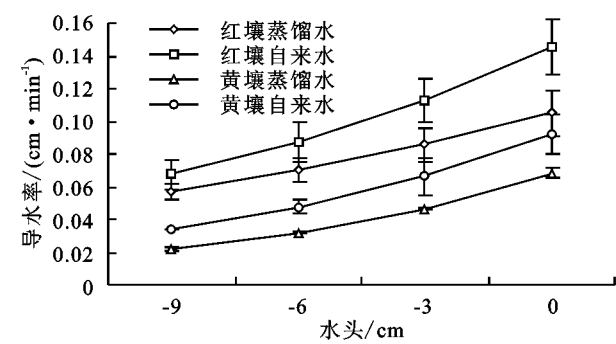
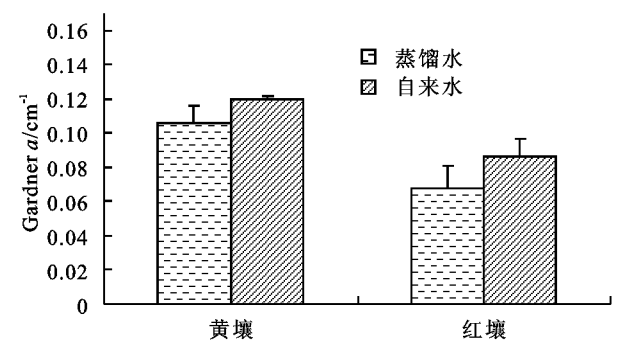


图 3 不同水质入渗下土壤导水率及 Gardner α 值

2.3 不同类型入渗水对土壤孔隙贡献率的影响

土壤导水率的变化受不同级别土壤孔隙对水流贡献率的影响。图 4 为两种土壤各级孔隙对水流的贡献率,包括大孔隙(>0.5 mm)、中等孔隙 1($0.25\sim0.5$ mm)、中等孔隙 2($0.1\sim0.25$ mm)和小孔隙(<0.1 mm)对水流的贡献率。在蒸馏水与自来水两种水质入渗条件下,两种土壤小孔隙(<0.1 mm)对水流的贡献率保持最大,其余 3 种孔隙对水流的贡献率均表现为随孔隙减小而降低。试验中两种土壤大孔隙与中等孔隙对水流贡献率均随着入渗水电导率的增加而增大,而小孔隙对水流贡献率随入渗水电导率的增加而降低,且在针对红壤的入渗试验中,入渗水水质对土壤各级孔隙水流贡献率的影响显著($P<0.05$) (表 2),说明自来水灌溉可能增大了土壤小孔隙,进

著大于在蒸馏水入渗下的导水率($P<0.05$),在自来水入渗下红壤导水率 K_s 、 K_9 均显著大于在蒸馏水入渗下的导水率($P<0.05$)。在高水头压力下,两种类型入渗水测得的土壤导水率差异均不显著,表明入渗水水质对土壤导水率的影响主要在低压力水头下即细孔隙下的导水特性上,这可能由于自来水虽然含有盐分离子,但含量仍然很低,积累在土壤中的离子数量少,其对土壤颗粒之间排斥力的增加作用只在小孔隙中产生显著性影响,而在大孔隙中由于土壤颗粒之间的距离较大,相互之间的排斥力相对小孔隙较小,盐分离子对其的影响就较为微弱。孔隙大小分布常数 α 的平均值变化范围为 $0.07\sim0.13\text{ cm}^{-1}$,黄壤在蒸馏水与自来水灌溉条件下变异系数分别为 13.40%与 31.15%,红壤则分别为 17.38%与 31.01%,均表现为较弱的空间异质性^[18-19],表明试验在采用扰动土填装土箱中土壤孔隙大小分布相对均匀一致,两种土壤的孔隙大小分布均一性也较为接近,试验土壤初始孔隙大小分布对试验结果无影响。两种土壤 Gardner α 值均随着入渗水电导率的增大而增大,且红壤的 Gardner α 值变化显著($P<0.05$),表明入渗水中的盐分通过增大土壤小孔隙,降低了小孔隙分布的均一性,从而增加了土壤的空间异质性。



而增加中等孔隙及大孔隙的数量,相应的小孔隙的数量减少,使得小孔隙对水流的贡献率被降低,自来水中的微量盐分离子对土壤孔隙的影响主要发生在极小的土壤孔隙中,这种影响效应与土壤导水率、土壤 Gardner α 值的变化都可能源于入渗水盐分积累对小孔隙中土壤颗粒絮凝作用的增强。

3 讨论

微咸水灌溉中的盐分可以促进土壤水分入渗,这是因为蒸馏水电导率极低,水中盐分含量低,其入渗进入土壤后基本不会发生离子交换作用,而会迅速溶出土体内存在的钠离子,黏粒的絮凝状态因而改变,其分散程度增大^[20],导致土壤入渗速率降低,入渗时间变长。自来水电导率远高于蒸馏水,自来水入渗后增加了土壤含盐量,土壤溶液中盐分浓度增加使扩散双电子层向粘粒

表面压缩,土壤颗粒之间的排斥力减小,土壤粒子的物理稳定性下降,土壤胶体的絮凝作用随之增强,这种环境下更易形成能使土壤导水能力提高的团粒结构^[21],因此,土壤入渗率、吸渗率及导水率这些反映土壤导水特性的参数均随入渗水矿化度增大而增大;但如果入渗水盐分浓度继续增加至超过一定阈值,有研究^[5]表明随入渗水矿化度的持续增大,土壤导水能力先增强后减弱。入渗水电导率的增大使入渗过程进入土壤中的钠离子数量也随之增加,钠离子会引起土壤颗粒的膨胀和分散从而改变土壤物理特性^[22],土壤的透水性和透气性变差,因此土壤的导水和持水能力因钠离子影响随之降低,由此可见入渗水电导率的高低并不能完全决定土壤

导水的能力强弱,所以在多种因素的交互作用下,直接分析土壤的导水能力与入渗水电导率之间的定量关系是困难的。野外实地测量土壤导水率时,即使采用自来水也可能会因为盐分的运移特征与蒸馏水不同而影响试验结果。在两种土壤的对比中,红壤相关参数随入渗水电导率不同而呈现的变化比黄壤显著,这说明仍有其他因素影响土壤水力性质,不同类型土壤的物理特性或与土壤导水特性相关^[23],入渗水水质对相关参数的影响还需做进一步研究。在实践中,野外试验选取自来水作为试验入渗水源时,应考虑相关参数即土壤入渗率、吸渗率及导水率的测定结果相较于准确值的偏差,提高结论的准确性和可信度。

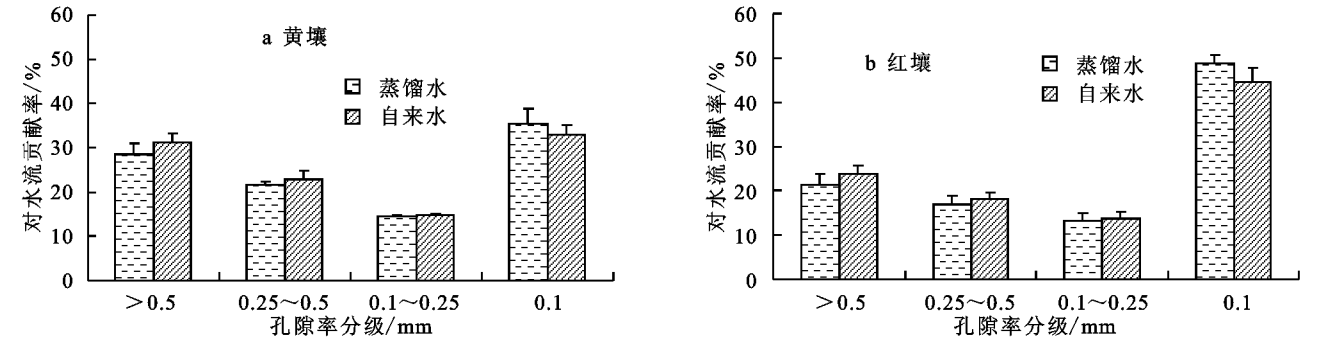


图 4 不同类型入渗水对各级土壤孔隙对水流的贡献率

表 2 各级土壤孔隙对水流贡献率的方差分析

不同水质入渗下土壤类型	因变量	方差	自由度	均方差	统计量 <i>F</i>	<i>P</i> 值
黄壤	大孔隙	20.704	1	20.7035	5.0258	0.0884
	中等孔隙 1	4.898	1	4.8981	13.2781	0.0677
	中等孔隙 2	0.315	1	0.3153	8.8771	0.0508
	小孔隙	66.864	1	66.8639	12.6415	0.0708
红壤	大孔隙	105.245	1	105.2451	12.9972	0.0227
	中等孔隙 1	0.003	1	0.0034	12.4536	0.0243
	中等孔隙 2	0.001	1	0.0008	10.2500	0.0329
	小孔隙	0.036	1	0.0360	12.6157	0.0238

4 结 论

采用圆盘负压入渗法研究了黄壤和红壤在两种水质水(蒸馏水和自来水)入渗下土壤入渗率、吸渗率、导水率、土壤孔隙大小分布常数及土壤孔隙对水流贡献率的变化,主要结论为:

(1)两种土壤初始入渗率和稳定入渗率均随着入渗水电导率的增大而增大;

(2)两种土壤吸渗率均随入渗水电导率增大而增大,在不同电导率入渗水作用下红壤吸渗率变化差异显著($P<0.05$);

(3)土壤导水率 K_s 、 K_3 、 K_6 、 K_9 及土壤 Gardner α 值基本随入渗水的电导率的增大而增大。在低水头压力下,两种类型入渗水测得的土壤导水率差异显著($P<0.05$),在高水头压力下,两种类型入渗水测得的土壤导水率差异不显著,表明入渗水水质对土壤导水率的影响主要在低压力水头下即细孔隙下的导水特性上;

(4)两种土壤大孔隙与中等孔隙对水流贡献率随入渗水电导率增加而增大,而小孔隙对水流贡献率随之降低。针对红壤的入渗试验中,入渗水水质对土壤各级孔隙水流贡献率的影响达到显著水平($P<0.05$)。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 肖娟,江培福,郭秀峰,等. 负水头条件下水质对湿润体运移及水盐分布的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(5):101-107.

[4] 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(2):84-87.

[5] 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征的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(7):64-75.

[6] 唐胜强,余冬立. 灌溉水质对土壤饱和和导水率和入渗特性的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(10):108-114.