doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.018

# 围垦年限和土壤容重对海涂土壤水分运动参数的影响*

佘冬立[1]　郑加兴[1]　刘营营[2]　高雪梅[1]

(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.广州市珠江堤防管理处,广州 510640)

**摘要**:为探讨围垦年限和土壤容重双因素对海涂土壤水分运动参数的影响,在室内试验的基础上结合理论计算,对海涂 4 个年限围垦区土壤 2 个不同容重下土壤导水率、水分特征曲线和扩散率的变化进行了研究。结果表明:围垦年限对土壤颗粒组成、结构及钠盐含量等影响显著,土壤饱和导水率随围垦年限的增长而减小;持水能力、土壤水分扩散率随围垦年限的增长而增大。土壤饱和导水率、吸渗率、土壤水分扩散率及相同土壤吸力下的含水率均随容重的增大而减小,随着围垦年限的增长,土壤容重对水分运动参数的影响更明显。

**关键词**:圆盘入渗仪　围垦年限　土壤容重　土壤水分　土壤入渗

**中图分类号**:S152.5;S152.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)02-0120-06

# Effects of Land Reclamation Time and Soil Bulk Density on Soil Hydraulic Parameters in Coastal Reclamation Region

She Dongli[1]　Zheng Jiaxing[1]　Liu Yingying[2]　Gao Xuemei[1]

(1. *Key Laboratory of Efficient Irrigation - Drainage and Agricultural Soil - Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*
2. *The Management Office of Zhujiang Embankment, Guangzhou* 510640, *China*)

**Abstract**: In order to investigate the effect of land reclamation time and soil bulk density on soil hydraulic parameters, a study combined laboratory experiments with theoretical analysis was conducted to examine the changes of soil saturated hydraulic conductivity, soil water characteristic curve, and diffusivity with two different bulk densities of four reclamation soils. Results showed that the land reclamation time had significant effects on soil particle component, soil structure, sodium salt content, and so on. Soil saturated hydraulic conductivity decreased with the increase of land reclamation time, while water-holding capacity and soil moisture diffusivity increased with the increase of land reclamation time. Soil saturated hydraulic conductivity, diffusivity and soil water content under the same suction force decreased with the increase of bulk density. With increasing reclamation time, the influences of soil bulk density change on soil hydraulic parameters became more obvious.

**Key words**: Disc infiltrometer　Land reclamation time　Soil bulk density　Soil water content　Soil infiltration

## 引言

海涂盐碱地是当前可利用的重要土地储备资源,科学围垦和开发海涂盐碱地,对弥补我国耕地资源不足、确保国家粮食安全、拓展沿海发展空间具有不可替代的作用。海涂盐碱地土壤物理性质尤其是土壤水分运动参数的研究对海涂土壤的进一步合理开发具有重要意义。

收稿日期:2014-02-08　修回日期:2014-03-30

*国家自然科学基金资助项目(41471180、51109063)和江苏省高校优质科技创新团队资助项目

**作者简介**:佘冬立,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

土壤水分运动参数受诸多因素影响[1-5]，如土壤颗粒大小分布、有机质含量、土壤容重、土壤结构、阳离子交换量、温度等。许多学者研究了容重对土壤水分运动参数的影响[6-8]。Bahmann 等[9]研究了温度对土壤水分特征曲线的影响，获得了吸力、含水量、温度 3 变量的空间曲面。高红贝等[10]研究了温度对土壤水分运动参数的影响。而针对海涂土壤的水分运动参数影响因素的研究较少，从长远来看，在海涂土壤发生演变过程中，时间是最重要的因子，土壤各层次性质变化均受到时间因素影响，同时，人为因素对土壤性质也有重要影响。本文在室内试验的基础上结合理论计算，分析了围垦年限和土壤容重双因素对土壤水分运动参数的影响，以期为海涂围垦区土壤的开发利用提供科学支持。

## 1　试验材料与方法

### 1.1　供试材料

试验土壤取自江苏省如东县沿海围垦区。采用空间序列代替时间序列的方法，在样带上选取 4 个典型时期滩涂围垦区作为供试土壤的采集点（图 1）。取样时间为 2012 年 6 月。试验区的土壤颜色呈青灰色，剖面中、下部有锈斑，主要表现为钠盐含量高、砂性强、有机质和粘粒含量低、土壤结构差。各围垦区土壤基本特性、土地利用等如表 1 所示。各围垦区选择 5 个样点，取表层 0 ~ 20 cm 土壤，充分混合、自然风干、研磨并过 1 mm 筛备用。

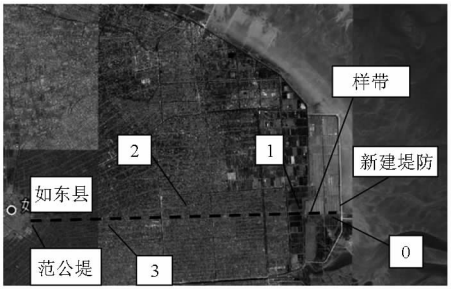


图 1　研究区位置及 4 个不同年份围垦区

Fig. 1　Location of study site and four farmland areas reclaimed at different times

0. 2007 年　1. 1981 年　2. 1940 年　3. 1650 年

表 1　土壤特性

Tab. 1　Basic properties of experimental soils

| 土壤编号 | 围垦年份 | 有机质质量比 /(g·kg$^{-1}$) | 粘粒含量/% | 粉粒含量/% | 钠离子质量比 /(g·kg$^{-1}$) | 电导率 /(mS·cm$^{-1}$) | 土地利用类型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2007 | 3.26 ± 0.11 | 8.5 ± 0.6 | 52.9 ± 2.04 | 1.60 ± 0.43 | 5.98 ± 1.05 | 无 |
| 1 | 1981 | 8.73 ± 0.32 | 13.6 ± 0.8 | 48.2 ± 5.47 | 0.45 ± 0.18 | 2.14 ± 0.72 | 菜地 |
| 2 | 1940 | 16.48 ± 0.51 | 16.6 ± 1.4 | 41.7 ± 3.61 | 0.05 ± 0.04 | 0.27 ± 0.14 | 菜地 |
| 3 | 1650 | 23.22 ± 1.04 | 16.9 ± 1.0 | 39.2 ± 4.14 | 0.04 ± 0.04 | 0.30 ± 0.07 | 菜地 |

### 1.2　研究方法

试验于 2012 年 6 月—12 月在南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室进行。采用压力膜仪法测定土壤水分特征曲线，装填土壤容重分别控制在 1.2 g/cm$^3$ 和 1.4 g/cm$^3$。采用一维垂直积水入渗法测定不同容重下土壤饱和导水率[10]。试验装置由直径为 5 cm、高为 40 cm 的有机玻璃圆柱和直径为 8 cm 的马氏瓶供水系统两部分组成。将 4 种土壤按照设定的容重（1.2、1.4 g/cm$^3$）分层（每层 50 mm）均匀装入有机玻璃圆柱内，土柱高度为 10 cm。为防止土柱底部土样流失和表层土壤受到强烈冲击，在土柱底部和表面分别放一层滤纸。试验采用马氏瓶进行供水并控制水位，水位控制在 50 mm 左右。为消除温度影响，实验室室内温度控制在 18 ~ 22℃，待土柱充分饱和后记录一定时间段内穿透的水量。

采用一维水平入渗确定 van Genuchten 模型参数及土壤水分扩散率[10]。试验装置由直径 6 cm、高为 45 cm 的有机玻璃土柱和直径为 8 cm 的马氏瓶供水系统两部分组成。将 4 种土壤按照预先设定的容重（1.2 g/cm$^3$ 和 1.4 g/cm$^3$）分层（每层 50 mm）均匀地装入有机玻璃圆柱内，土柱高度为 45 cm，土柱底部和表面分别放一层滤纸。将装好的土柱水平放置在试验台，利用马氏瓶供水，保持水头为零。试验过程中，记录累积入渗量、湿润锋和入渗时间，当湿润锋达到土柱长度的 40 cm 左右时，结束试验，并快速取滤纸下 2 ~ 3 cm 处湿土用干燥法测定土壤饱和含水率。各试验重复 3 次，为消除温度的影响，实验室室内温度控制在 18 ~ 22℃。

## 2　结果分析

### 2.1　围垦年限及土壤容重对饱和导水率的影响

土壤饱和导水率是描述土壤水分运动的基本量化参数之一，与土壤质地、结构密切相关[11]。图 2 列出了 4 种土壤不同容重下的饱和导水率。图中小写字母表示相同容重下 4 种土壤饱和导水率的差异，相同字母表示两者间无显著性差异（$p < 0.05$）；大写字母表示同种土壤在不同容重下饱和导水率的

差异,相同字母表示两者间无显著性差异($p < 0.05$)。对于同一土壤,饱和导水率随土壤容重增加而减小,容重为1.2 g/cm$^3$下的导水率是容重为1.4 g/cm$^3$下的1.8~10.0倍,不同容重下土壤饱和导水率的差异显著($p < 0.05$)。土壤饱和导水率与土壤孔隙数量有着密切联系,土壤容重改变了土壤孔隙状况从而导致土壤饱和导水率的变化。4种土壤容重为1.2 g/cm$^3$的饱和导水率分别是容重为1.4 g/cm$^3$的1.8、3.0、7.0、10.0倍,表明围垦年限越长,土壤容重对饱和导水率的影响越大。在同一容重下,围垦年限对土壤饱和导水率有一定的影响(图2)。容重为1.2 g/cm$^3$时,只有1号土和2号土之间的土壤饱和导水率差异不显著,其他土壤间差异均显著;容重为1.4 g/cm$^3$时,只有2号土和3号土的土壤饱和导水率差异不显著,其他差异均显著,0号土的饱和导水率在容重为1.2 g/cm$^3$和1.4 g/cm$^3$时分别是3号土的11倍和15倍。围垦初期土壤粉粒及砂粒含量高,土壤结构性差,尽管钠盐含量高,土壤饱和导水率仍保持较高的水平,表明土壤质地对土壤导水特性起决定性作用。随着围垦年限的增长,土壤熟化,土壤粘粒含量增多,土壤饱和导水率降低,这与吕殿青等[12]的研究结果一致,特别是由于围垦年限长的土壤结构性良好,增加土壤容重对降低饱和导水率的影响越明显。

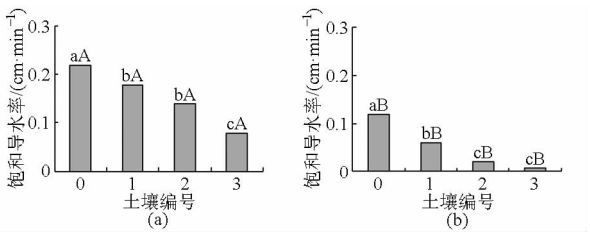


图2 4种土壤不同容重下的饱和导水率

Fig. 2 Soil saturated hydraulic conductivity of tested soils

(a) 土壤容重1.2 g/cm$^3$ (b) 土壤容重1.4 g/cm$^3$

## 2.2 围垦年限及土壤容重对水分特征曲线的影响

土壤水分特征曲线反映了土壤孔隙状况与含水率之间的关系,是研究土壤水分保持与运动特性的基本参数。图3为4个围垦年限土壤2个不同容重下的水分特征曲线。分析可知,土壤水分特征曲线在高吸力段(40~100 kPa)比较陡直,在低吸力段(0~40 kPa)比较平缓。对同种土壤而言,土壤水吸力相同时,随容重的增加,土壤体积含水率降低,容重为1.2 g/cm$^3$时的体积含水率是容重为1.4 g/cm$^3$时的1.1~1.9倍。在低吸力下,围垦年限较长的海涂土壤的持水能力较强,其所吸持的含水量也较高。围垦年限越短,土壤水分特征曲线越缓,土壤颗粒组成以粉砂粒为主,其持水能力较弱,低吸力(小于40 kPa)条件下所吸持的含水量较高,当土壤吸力达到100 kPa时,土壤含水率达到0.1 cm$^3$/cm$^3$左右。随着围垦年限的增长,围垦区土壤经过降雨淋洗脱盐、耕作利用等,熟化程度较高,土壤结构得到改善,粘粒含量增加,从而提高了其持水能力。

## 2.3 围垦年限及土壤容重对 van Genuchten 模型参数的影响

van Genuchten模型具有很好的灵活性,是目前应用最广泛的土壤水分特征曲线模型之一[13]。邵明安等[14]通过水平入渗试验和一维水平非饱和流方程的积分推求van Genuchten模型参数$\alpha$和$n$,本

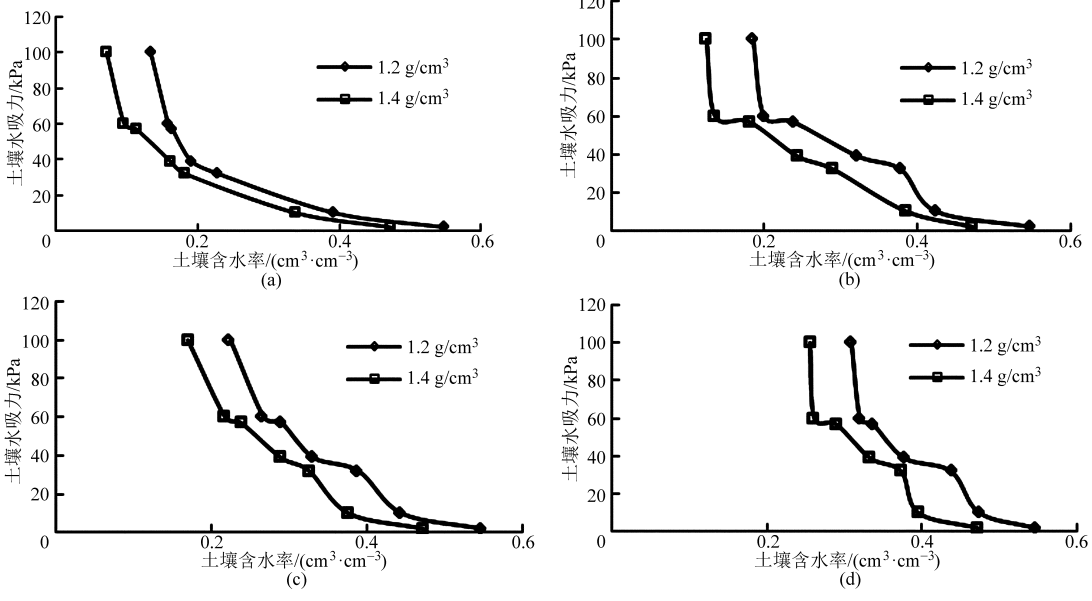


图3 4种土壤不同容重下的水分特征曲线

Fig. 3 Effect of bulk density on soil water retention curves under four different soils

(a) 0号土 (b) 1号土 (c) 2号土 (d) 3号土

文通过此方法获得不同年限围垦区土壤 van Genuchten 模型参数，分析围垦年限与土壤容重变化对土壤水分特征曲线模型参数的影响。van Genuchten 特征曲线模型[13]为

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + \alpha|h|^n)^{-m} \quad (1)$$

其中　　$m = 1 - 1/n$

式中　$\theta$——土壤含水率，$cm^3/cm^3$

$\theta_s$——土壤饱和含水率，$cm^3/cm^3$

$\theta_r$——土壤滞留含水率，$cm^3/cm^3$

$\alpha$——标定参数，$cm^{-1}$

$n$——土壤水分特征曲线指数

邵明安等[14]推求 van Genuchten 模型中的参数 $n$ 和 $\alpha$ 为

$$n = \frac{S}{d(\theta_s - \theta_i) - S} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{2K_s}{sd}\left(\frac{1}{m}\frac{\theta_s - \theta_i}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中　$\theta_i$——土壤初始含水率，$cm^3/cm^3$

$S$——吸渗率，$cm/min^{0.5}$

$d$——Boltzmann 变量（$\lambda = x/t^{1/2}$）的最大值即特征湿润长度，$cm/min^{0.5}$

$K_s$——饱和导水率，cm/min

则入渗通量 $q$ 表示为

$$q = \frac{S}{2t^{1/2}} \quad (4)$$

表 2 为该推求方法所需的土壤参数。由表 2 可知，$S$、$d$ 和 $\theta_s$ 均随容重的增大而递减。对于同种土壤而言，土壤容重越大，土壤孔隙则越小，水分运动受到的阻力越大，相同时间内湿润锋的位移越小，吸渗率 $S$ 及特征湿润长度 $d$ 越小，土壤的大孔隙越少，土壤的饱和含水率 $\theta_s$ 越低。

推求的 van Genuchten 模型参数 $n$ 和 $\alpha$ 与根据实测水分特征曲线拟合的参数趋势一致；但根据水分特征曲线拟合的 $n$ 值变化范围为 1.26 ~ 1.88，低于式(2)推求的 $n$ 值，而拟合的参数 $\alpha$ 值变化范围为 0.006 ~ 0.065 $cm^{-1}$，高于式(3)推求的 $\alpha$ 值（表 3）。这主要是由于本试验仅测定了 0 ~ 100 kPa 压力下土壤脱湿曲线，且测定的曲线数据点相对较少，影响了参数的拟合精度。从表 3 可知，不同围垦年限土壤的 van Genuchten 模型参数 $n$ 均随着容重的增加而增加，容重为 1.4 $g/cm^3$ 时的 $n$ 值是容重为 1.2 $g/cm^3$ 时的 1.78 ~ 2.10 倍；同一容重下，$n$ 随围垦年限增加而增加，3 号土壤的 $n$ 值在容重为 1.2 $g/cm^3$ 和 1.4 $g/cm^3$ 时分别是 0 号土的 2.48 ~ 2.65 倍。来剑斌等[15]通过对 5 种不同质地土壤的颗粒组成对 van Genuchten 模型参数影响的分析认为，该模型参数与土壤粘粒含量有着极显著的相关关系，$\alpha$ 随粘粒含量的增加而减小，这与本研究的结果一致，围垦年限越长，粘粒含量越高，$\alpha$ 越小。

**表 2　不同围垦年限土壤不同容重下测定的 $S$、$d$ 和 $\theta$ 值**

**Tab. 2　The values of $S$、$d$ and $\theta$ of four different soils under different bulk densities**

| 土壤编号 | 容重/($g\cdot cm^{-3}$) | $S$/($cm\cdot min^{-0.5}$) | $d$/($cm\cdot min^{-0.5}$) | $\theta_s$/($cm^3\cdot cm^{-3}$) | $\theta_i$/($cm^3\cdot cm^{-3}$) | $\theta_r$/($cm^3\cdot cm^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1.2 | 6.53 | 20.85 | 0.46 | 0.008 4 | 0.001 |
| | 1.4 | 5.95 | 16.67 | 0.44 | 0.009 8 | 0.001 |
| 1 | 1.2 | 5.29 | 15.50 | 0.52 | 0.009 6 | 0.001 |
| | 1.4 | 4.29 | 11.35 | 0.50 | 0.011 2 | 0.001 |
| 2 | 1.2 | 4.82 | 10.96 | 0.56 | 0.009 6 | 0.001 |
| | 1.4 | 3.05 | 7.27 | 0.49 | 0.011 2 | 0.001 |
| 3 | 1.2 | 5.00 | 10.23 | 0.57 | 0.009 6 | 0.001 |
| | 1.4 | 3.20 | 7.54 | 0.49 | 0.011 2 | 0.001 |

**表 3　不同围垦年限土壤不同容重下 van Genuchten 模型参数**

**Tab. 3　Parameters of van Genuchten model of four different soils under different bulk densities**

| 模型参数 | 容重/($g\cdot cm^{-3}$) | 0 号土 | 1 号土 | 2 号土 | 3 号土 |
|---|---|---|---|---|---|
| $n$ | 1.2 | 1.50 | 1.91 | 3.98 | 3.98 |
| | 1.4 | 3.15 | 3.41 | 7.08 | 7.80 |
| $\alpha/cm^{-1}$ | 1.2 | 0.006 6 | 0.006 4 | 0.005 7 | 0.003 7 |
| | 1.4 | 0.002 7 | 0.002 7 | 0.001 8 | 0.000 7 |

## 2.4　围垦年限及土壤容重对土壤水分扩散率的影响

水平吸渗法是测定土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 的非稳定流方法，计算公式为[11]

$$D(\theta) = \frac{-1}{2(\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}\lambda)}\int_{\theta_i}^{\theta}\lambda\,\mathrm{d}\theta \quad (5)$$

式中　$\lambda$——特征湿润长度

利用差分形式对式(5)进行求解可表示为

$$D(\theta) = -\frac{1}{2}\frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta}\sum_{\theta_i}^{\theta}\lambda\Delta\theta \quad (6)$$

利用水平土柱入渗试验，根据试验时间 $t$ 和该时刻所测定的土壤含水率分布，用式 $\lambda = x/t^{1/2}$ 计算出不同 $\theta$ 值对应的 $\lambda$ 值，将其点绘在坐标纸上，由式(6)计算得 $D(\theta)$ 随 $\theta$ 变化的函数关系式。图 4 为 4 个围垦年限土壤 2 个不同容重下扩散率与含水

率之间的关系。分析可知,扩散率随含水率增大而逐渐增大,高含水率下的扩散率远大于低含水率下的扩散率,这主要是因为在水平入渗过程中的主要推动力为土壤吸力梯度,含水率大,湿润锋界面干-湿土壤吸力梯度大,故水分扩散率也大,吸力梯度的变化是非线性的,因而扩散率的变化也是非线性的。

不同土壤容重对扩散率的影响因含水率不同而不同,当含水率 $\theta < 0.25\ cm^3/cm^3$ 时,容重对扩散率的影响较小;而当含水率 $\theta > 0.25\ cm^3/cm^3$ 时,容重对扩散率的影响较大。已有研究表明[11],在土壤水分入渗过程中,首先满足土壤颗粒表面所吸持的膜状水,其次为细小孔隙的毛管水,最后为自由水。在低含水率下,土壤吸渗的水分仅满足前 2 类水分的吸持,因而扩散率较低,不同容重下的土壤孔隙数量、种类的不同不足以影响其扩散率。在高含水率下则不同,含水率越大,充斥于孔隙中的自由水也较多,此时容重小的土壤,由于孔隙数量(特别是大孔隙)较多,允许水分扩散的空间较大,其水分扩散率也较大;而容重较大的土壤,由于孔隙(特别是大孔隙)数量较少,限制了水分的扩散能力,因而其扩散率较低。对同一容重而言,含水率相同时扩散率从大到小依次为 0 号土、1 号土、2 号土、3 号土,表明扩散率随围垦年限的增长而减小。分析原因可能是,围垦初期土壤砂性强,持水能力弱,水分扩散容易;而随着围垦年限增长,土壤粘粒含量越多,孔隙分布越均匀,结构性越好,持水能力增强而水分扩散能力减弱。另外,甘永德等[16]研究的结果也表明,不同含盐量土壤之间的水分扩散率存在明显的差异,在相同土壤含水量情况下,土壤水分扩散率随土壤含盐量的增大而增大。本研究中随围垦年限增长,土壤含盐量降低(表 1)[17],相应的土壤水分扩散率也呈降低趋势,这与甘永德等[16]的研究结果一致。因此,围垦区土壤水分扩散率变化受土壤质地、结构及土壤含盐量等多因素的综合影响,需要进一步设置单因素控制试验,确定各因素对其变化的影响程度。

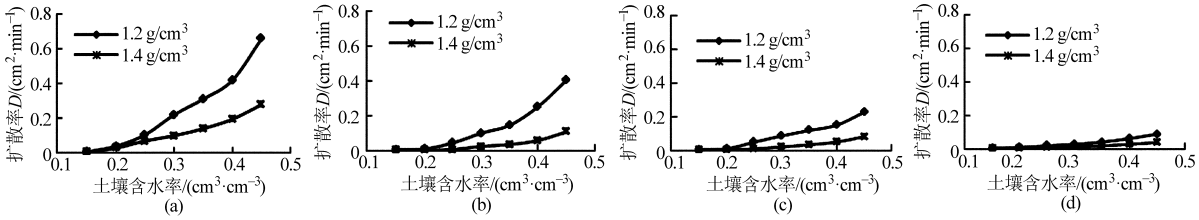


图 4 4 种土壤不同容重下的土壤水分扩散率

Fig. 4 Variation of soil water diffusivity with volumetric water content of four different soils under different bulk densities

(a) 0 号土 (b) 1 号土 (c) 2 号土 (d) 3 号土

## 3 讨论

土壤水分运动参数主要受土壤质地、结构、容重、温度等影响。此外,土壤吸附性离子的种类和数量等因素也会影响土壤水分运动参数。在众多的影响因素中,土壤质地是最主要的影响因素之一。海涂土壤由于沉积环境、地理位置等的差异,其土壤质地也表现出一定的差异。李小刚[3]研究表明,土壤质地对土壤水分特征曲线的影响最明显。汪湖北等[18]研究表明土壤持水量与其小于 0.01 mm 的物理性粘粒含量呈极显著的正相关关系,在高吸力段,海涂土壤的持水量主要取决于土壤颗粒表面与水分产生的分子吸力;在吸力段,海涂土壤的持水量主要取决于海涂的围垦年限,围垦年限较长的海涂土壤持水量均高于围垦年限较短的海涂土壤。樊贵盛等[19]研究表明原生盐碱荒地土壤的入渗能力与其含盐量呈反比关系。郭凤台等[20]通过室内不同氯化钠含量土壤的水平一维入渗试验分析氯化钠含量对水平一维入渗特性的影响,结果表明土壤中氯化钠含量越高,在相同入渗时间内土壤湿润锋、累积入渗量、土壤含水率越小。本研究土壤水分运动基本参数受到土壤质地、容重、含盐量等多种因素的交互作用,但其变化规律与土壤容重、粘粒、粉粒和砂粒含量密切相关,与含盐量的相关关系不显著(表 1),含盐量对不同质地土壤水分运动基本参数的影响需要进一步研究。

## 4 结论

(1) 围垦年限对土壤颗粒组成、结构及钠盐含量等影响显著。土壤饱和导水率随围垦年限的增长而减小;持水能力、水分扩散率随围垦年限的增长而增大,van Genuchten 模型参数 $n$ 与围垦年限呈正比关系,$\alpha$ 值与围垦年限呈反比关系。

(2) 土壤饱和导水率、水分扩散率及相同土壤水吸力下的含水率均随容重的增大而减小。van Genuchten 模型参数 $n$ 与容重呈正比关系,$\alpha$ 与容重呈反比关系。随围垦年限的增长,土壤容重对土壤水分运动参数的影响更明显。

（3）本研究土壤水分运动参数与土壤容重、粘粒、粉粒和砂粒含量密切相关，与含盐量的相关关系不显著，含盐量对不同质地土壤水分运动参数的影响需要进一步研究。

## 参 考 文 献


1 曹红霞，康绍忠，武海霞. 同一质地（重壤土）土壤水分特征曲线的研究[J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版，2002，30(1)：9－12.
Cao Hongxia，Kang Shaozhong，Wu Haixia. Study on soil water characteristic of soils of same quality (heavy loam)[J]. Journal of Northwest A&F University：Natural Science Edition，2002，30(1)：9－12.(in Chinese)

2 She D L，Shao M A，Hu W，et al. Variability of soil water-physical properties in a small catchment of the Loess Plateau，China [J]. African Journal of Agricultural Research，2010，5(22)：3041－3049.

3 李小刚. 影响土壤水分特征曲线的因素[J]. 甘肃农业大学学报，1994，29(3)：273－278.
Li Xiaogang. Factors affecting soil moisture characteristic curve[J]. Journal of Gansu Agricultural University，1994，29(3)：273－278.(in Chinese)

4 Wang Y Q，Shao M A，Liu Z P，et al. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China[J]. Journal of Hydrology，2013，487：13－23.

5 王卫华，王全九. 基于 GPS 与 GE 的土壤水力参数空间变异采样间距确定[J]. 农业机械学报，2014，45(3)：97－100，106.
Wang Weihau，Wang Quanjiu. Sample spacing of spatial variability of soil hydraulic parameters in basin scale based on GPS and Google Earth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(3)：97－100，106.(in Chinese)

6 刘营营，佘冬立，刘冬冬，等. 土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报，2013，27(5)：84－88，94.
Liu Yingying，She Dongli，Liu Dongdong，et al. Influence of land use patterns and soil bulk density on soil infiltration process [J]. Journal of Soil and Water Conservation，2013，27(5)：84－88，94.(in Chinese)

7 Badorreck A，Gerke H H，Hüttl R F. Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment[J]. Soil and Tillage Research，2013，129：1－8.

8 Richard G，Cousin I，Sillon J F，et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil：influence on unsaturated hydraulic properties[J]. European Journal of Soil Science，2001，52(1)：49－58.

9 Bachmann J，Horton R，Grant S A，et al. Temperature dependence of water retention curves for wettable and water-repellent soils [J]. Soil Science Society of America Journal，2002，66(1)：44－52.

10 高红贝，邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水科学进展，2011，22(4)：484－493.
Gao Hongbei，Shao Ming'an. Effect of temperature on soil moisture parameters[J]. Advances in Water Science，2011，22(4)：484－493.(in Chinese)

11 雷志栋，杨诗秀. 土壤水动力学[M]. 北京：清华大学出版社，1988：5－261.

12 吕殿青，邵明安，刘春平. 容重对土壤饱和水分运动参数的影响[J]. 水土保持学报，2006，20(3)：154－157.
Lü Dianqing，Shao Ming'an，Liu Chunping. Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2006，20(3)：154－157.(in Chinese)

13 van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal，1980，44(5)：892－898.

14 邵明安，王全九. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法：Ⅰ理论分析[J]. 土壤学报，2000，37(1)：1－8.
Shao Ming'an，Wang Quanjiu. A simple infiltration method for estimating soil hydraulic properties of unsaturated soils：I. theoretical analysis[J]. Acta Pedologica Sinica，2000，37(1)：1－8.(in Chinese)

15 来剑斌，王全九. 土壤水分特征曲线模型比较分析[J]. 水土保持学报，2003，17(1)：137－140.
Lai Jianbin，Wang Quanjiu. Comparison of soil water retention curve model[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2003，17(1)：137－140.(in Chinese)

16 甘永德，胡顺军，陈秀龙. 土壤盐分对土壤水分扩散率的影响[J]. 水土保持通报，2010，30(6)：56－59.
Gan Yongde，Hu Shunjun，Chen Xiulong. Influence of soil salt content on soil water diffusivity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2010，30(6)：56－59.(in Chinese)

17 She D L，Fei Y H，Liu Z P，et al. Soil erosion characteristics of ditch banks during reclamation of a saline/sodic soil in a coastal region of China：field investigation and rainfall simulation[J]. CATENA，2014，121：176－185.

18 汪湖北，卢升高. 浙北海涂土壤持水特性研究[J]. 浙江大学学报：农业与生命科学版，2001，27(6)：611－614.
Wang Hubei，Lu Shenggao. Study on water retention characteristics of coastal soils in Northern Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang University：Agriculture and Life Sciences，2001，27(6)：611－614.(in Chinese)

19 樊贵盛，李尧，苏冬阳，等. 大田原生盐碱荒地入渗特性的试验[J]. 农业工程学报，2012，28(19)：63－70.
Fan Guisheng，Li Yao，Su Dongyang，et al. Study on infiltration characteristics of original saline-alkali wasteland[J]. Transactions of the CSAE，2012，28(19)：63－70.(in Chinese)

20 郭凤台，姜素云，王晓兰，等. 土壤氯化钠含量对水平一维入渗特性的影响[J]. 人民黄河，2010，32(12)：149－150.
Guo Fengtai，Jiang Suyun，Wang Xiaolan，et al. Effect of soil sodium chloride contents on characteristic of one-dimension horizontal infiltration[J]. Yellow River，2012，32(12)：149－150.(in Chinese)