

# 贺兰山西麓绿洲土壤水分的入渗特性

郑策<sup>1,2</sup>, 卢玉东<sup>1,2</sup>, 郭建青<sup>1,2</sup>, 李环环<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** [目的] 研究贺兰山西麓腰坝绿洲土壤水分入渗特性, 为当地合理利用水资源和农田灌溉提供理论依据。[方法] 在当地选取 21 个试验点进行野外双环入渗试验, 利用不同入渗公式对实测结果进行拟合, 并通过多元分析及地统计学方法分析土壤水分入渗特性。[结果] Horton 公式的拟合结果相关系数高达 0.963, 相对误差与均方根误差分别仅为 4.09% 与 0.046 mm/min, 拟合精度要优于 Philip 公式与 Kostiakov 公式, 且模型参数具有较好的物理意义。土壤质地对入渗过程有显著性影响, 土壤中含砂量越高, 入渗速率越大, 达到稳定所需时间越短, 而土壤容重与初始含水率则分别对累积入渗量及初始入渗率有一定影响。稳定入渗率最大值约为最小值的 12 倍, 变异系数高达 0.677, 且由东北向西南呈现递减的趋势。[结论] Horton 公式适用于描述腰坝绿洲土壤水分入渗过程, 土壤性质差异对入渗过程有较大影响, 同时在空间上入渗率也存在较强变异性。

**关键词:** 土壤水分; 双环试验; Horton 公式; 入渗规律; 腰坝绿洲

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)05-0146-06

**中图分类号:** S152.7

**文献参数:** 郑策, 卢玉东, 郭建青, 等. 贺兰山西麓绿洲土壤水分的入渗特性[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 146-151. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.025; Zheng Ce, Lu Yudong, Guo Jianqing, et al. Soil water infiltration characteristics in oasis on west side of Helan Mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 146-151. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.025

## Soil Water Infiltration Characteristics in Oasis on West Side of Helan Mountains

ZHENG Ce<sup>1,2</sup>, LU Yudong<sup>1,2</sup>, GUO Jianqing<sup>1,2</sup>, LI Huanhuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study was to analyze the characteristics of soil water infiltration in Yaoba Oasis on the west side of Helan Mountains, and to provide theoretical basis for utilizing water resource efficiently and determining a reasonable way for field irrigation. [Methods] The double-ring infiltration experiments from 21 test spots were carried out. The three different infiltration formulas were used to fit the experimental data. And the soil water infiltration characteristics were analyzed using multivariate analysis and geostatistics methods. [Results] The correlation coefficient of fitting results of Horton formula was as high as 0.963, and the relative error and root mean square error were only 4.09% and 0.046 mm/min, respectively, indicating that the fitting accuracy of Horton formula was better than those of Philip formula and Kostiakov formula. Soil texture had a significant impact on infiltration process, great proportion of sand components in the soil had a faster infiltration rate and had relatively shorter time required to achieve stable infiltration. While the soil bulk density and initial water content had a certain influence on cumulative infiltration volume and initial infiltration rate, respectively. The maximum of stable infiltration rate was about 12 times than the minimum one and the coefficient of variation was up to 0.677. The spatial distribution plot showed a decreasing trend of infiltration rate from the northeast to the southwest of the oasis. [Conclusion]

收稿日期: 2017-03-25

修回日期: 2017-04-19

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“灌区包气带氮素生物地球化学动态对水分的响应过程研究”(41273104); 阿拉善 SEE 生态协会资助项目(220029150182)

第一作者: 郑策(1993—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士研究生, 研究方向为灌溉入渗。E-mail: 2015129041@chd.edu.cn。

通讯作者: 卢玉东(1969—), 男(汉族), 河北省唐山市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源利用方面的研究。E-mail: luyudongphd@163.com。

Horton formula could be used to describe the process of soil water infiltration in Yaoba Oasis. The difference of soil properties had a great influence on infiltration process, and the infiltration rate presented a strong spatial variability.

**Keywords:** soil water; double-ring test; Horton formula; infiltration law; Yaoba Oasis

入渗是指水分从土壤表面进入土壤内部形成土壤水的过程,同时也是降水、地表水、土壤水、地下水相互转化的重要环节<sup>[1]</sup>。土壤水分入渗是一个复杂的过程,受到土壤质地、容重、初始含水率及地下水位等多因素的影响,同时在时空分布上也存在着较多的不确定性。国内外学者对水分入渗特性已进行了大量的研究,如刘芝芹等<sup>[2]</sup>研究了金沙江流域土壤水分入渗特征,结果表明 Kostiakov 公式模拟双环入渗法测得的入渗过程效果最佳;Duan 等<sup>[3]</sup>模拟了不同入渗公式对草地的适用性,结果表明修正 Kostiakov 公式拟合效果最佳,而 Philip 公式拟合效果较差;宋小帅等<sup>[4]</sup>研究了典型森林类型的土壤水文效应,结果表明 Horton 模型拟合结果最接近实测值;肖庆礼等<sup>[5]</sup>研究了黑河中游绿洲不同质地土壤水分入渗情况,结果表明不同质地土壤水分入参与再分布存在明显差异;武敏等<sup>[6]</sup>研究了不同质地土壤水分入渗规律,结果表明壤砂土达到稳定入渗所需时间少于砂壤土及粉砂壤土。

虽然以往的研究取得了相当多的成果,但大多都是集中在水量相对充足的灌区之中,对干旱区的关注则相对较少。并且受土壤性质及周围环境的影响,土壤入渗规律往往具有一定的地域性。对于像腰坝绿洲这类地区,由于没有地表水流,日常生活与农业灌溉用水都要靠开采地下水,连年的过量开采导致当地地下水位不断下降,并因此引发了一系列水资源问题。因此了解当地土壤水分入渗过程,为其合理利用水资源提供指导成为亟待解决的问题。基于此目的,本文拟以野外双环入渗试验为基础,利用不同入渗公式拟合实测结果,确定适用于腰坝绿洲的最优入渗公式。并通过多元分析及地统计学方法分析不同土壤参数对入渗过程的影响以及入渗特性的空间变异性,以期为腰坝绿洲合理利用水资源、指导当地农田灌溉提供科学依据<sup>[7]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

腰坝绿洲位于 38° 25'—38° 36' N, 105° 32'—105° 39' E, 是内蒙古阿拉善高原的主要农牧区之一,行政区划隶属内蒙古自治区阿拉善左旗巴润别立镇,面积约 81.2 km<sup>2</sup>,地势总体呈东高西低。试验区内的气候属于典型的大陆性干旱气候,夏季酷热而冬季

寒冷,全年降雨稀少,气候干旱。年平均降雨量仅为 198 mm,而平均蒸发量却达到 2 394 mm。腰坝绿洲位于贺兰山西麓山前倾斜洪积平原水文地质区,赋存有多层结构的孔隙水及承压水,地下水的埋深由东北向西南逐渐变浅<sup>[8]</sup>。

### 1.2 试验方法

本次野外试验采用定水头双环入渗方法<sup>[9]</sup>,双环为同心环,内、外环直径分别为 20, 40 cm,环高 40 cm,试验时将双环插入地表下 20 cm,并在环底铺垫 3~5 cm 的小砾石作为缓冲层,防止表层的砂土被冲起。入渗时采用手动加水的方法,保持内外环的水头始终在 5 cm 处不变。试验刚开始时,每 3 min 记录加入的水量,随着单位时刻入渗量的减少,逐步调整为每 5, 10, 20 min 记录。每个点均观测 150 min(试验点达到稳定入渗的时间基本不超过 120 min),随后计算每时刻的入渗速率。

由于试验区内的地下潜水位由东北向西南不断变浅,故沿着地下水流方向在试验区由东北向西南布置 2 条平行的试验线,共计 21 个试验点。在每个点进行入渗试验之前,在其旁边就近开挖 1 m 深坑,从地表起每隔 20 cm 分别用 100 cm<sup>3</sup> 环刀与铝盒取原状土样,每晚将当日环刀所取土样送往当地水管站进行烘干试验测定其容重及初始含水量;野外试验结束后在室内利用 Bettersize 2000 激光粒度分布仪对铝盒所取土样进行颗粒分析试验,并对照国际制土壤质地分类标准命名,试验点的土壤质地共分为壤砂土、砂壤土与粉壤土 3 类;利用 GPS 定位仪确定各点的经纬度。具体试验点参数如表 1 所示。

### 1.3 入渗公式拟合

不同入渗公式具有不同的侧重点,选择最适用于研究区的入渗公式是了解当地入渗过程的基础<sup>[10]</sup>。本文选取在土壤入渗研究中最常用的 Horton 公式、Philip 公式和 Kostiakov 公式作为研究对象,利用回归分析方法分别对野外试验得到的实测数据进行拟合,并确定各公式的入渗参数。

Horton 公式:

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

Philip 公式:

$$f_t = At^{-\frac{1}{2}} + f_c \quad (2)$$

Kostiakov 公式:

$$f_t = nt^{-\alpha} \quad (3)$$

式中:  $f_t$ ——开始入渗后  $t$  时刻的入渗速率 (mm/min);  $f_c$ ——稳定后的入渗速率 (mm/min);  $f_0$ ——

入渗初始时刻的入渗速率 (mm/min);  $t$ ——时间 (min);  $k, A, n, \alpha$ ——相关入渗经验参数。具体拟合方法参考文献[11]。

表 1 试验点土壤特性参数

试验编号	土壤质地	经度	纬度	土壤粒径组成/%			容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	初始含水率/%
				砂粒	粉粒	黏粒		
1	壤砂土	105°38'09.04"	38°33'06.74"	85.10	10.68	4.22	1.62	13.84
2	粉壤土	105°37'43.18"	38°32'37.65"	68.98	17.67	13.35	1.62	9.65
3	砂壤土	105°37'13.20"	38°32'07.90"	54.65	28.55	16.80	1.37	10.68
4	砂壤土	105°36'34.92"	38°31'42.76"	41.75	50.57	7.68	1.45	15.39
5	壤砂土	105°36'10.15"	38°31'24.21"	73.89	16.46	9.65	1.65	15.36
6	壤砂土	105°35'40.40"	38°30'57.22"	79.14	13.04	7.82	1.65	14.35
7	砂壤土	105°35'10.89"	38°30'41.49"	50.36	38.86	10.78	1.48	15.87
8	壤砂土	105°34'34.94"	38°30'05.95"	71.60	18.54	9.86	1.62	14.25
9	粉壤土	105°34'10.81"	38°29'50.52"	34.30	52.46	13.24	1.40	12.36
10	壤砂土	105°38'17.40"	38°31'40.61"	81.15	13.50	5.35	1.66	16.60
11	砂壤土	105°37'52.76"	38°31'17.97"	56.62	28.98	14.40	1.53	15.06
12	粉壤土	105°37'22.82"	38°30'44.52"	43.89	47.35	8.76	1.38	14.59
13	粉壤土	105°36'46.63"	38°30'25.06"	61.34	26.32	12.34	1.57	13.56
14	砂壤土	105°36'15.92"	38°29'44.39"	40.24	48.47	11.29	1.44	12.64
15	壤砂土	105°35'57.04"	38°29'29.29"	73.52	18.12	8.36	1.64	18.69
16	砂壤土	105°35'18.84"	38°29'01.05"	49.68	40.44	9.88	1.47	11.25
17	粉壤土	105°34'52.66"	38°28'36.35"	38.90	52.90	8.20	1.42	9.87
18	粉壤土	105°34'27.35"	38°28'08.05"	34.78	54.24	10.98	1.39	15.50
19	粉壤土	105°33'52.86"	38°27'43.07"	36.55	51.29	12.16	1.39	10.63
20	壤砂土	105°33'31.05"	38°27'22.38"	83.28	10.11	6.61	1.66	14.79
21	砂壤土	105°33'10.17"	38°26'58.96"	47.36	44.23	8.41	1.46	9.68

## 2 结果与讨论

### 2.1 入渗公式的适用性评价

分别利用 Horton 公式、Philip 公式与 Kostiakov 公式对实测入渗数据进行拟合,结果如图 1 所示。因篇幅限制,3 种质地分别以砂壤土 4 号点、壤砂土 5 号点与粉壤土 18 号点为例。

由图 1 的拟合结果可以明显看出, Horton 公式拟合效果最好,而 Philip 公式与 Kostiakov 公式拟合的结果与实测值相比则有一定差距。

为了具体评价入渗公式的适用性,选取相关系数 ( $R$ )、相对误差 ( $R_E$ )、均方根误差 (RMSE) 作为评价指标。不同入渗公式拟合结果如表 2 所示,其中 RMSE 通过下式计算<sup>[12]</sup>。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{i_i} - f_{i_i}')^2}{n}} \quad (4)$$

式中:  $f_{i_i}$ ——该试验点第  $i$  个时间点的入渗公式拟合值;  $f_{i_i}'$ ——该试验点第  $i$  个时间点的双环试验实测值;  $n$ ——该试验点入渗过程的记录点数。

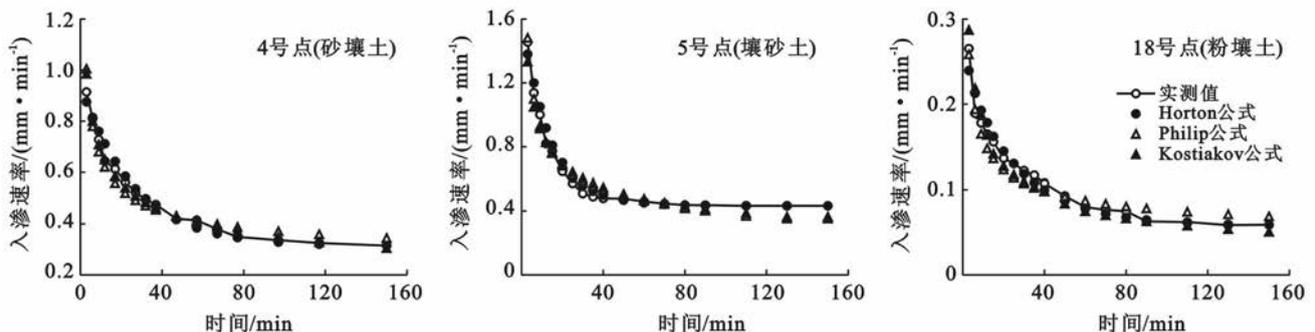


图 1 实测值与拟合值对比

表 2 不同入渗公式拟合结果比较

统计值	Horton 公式			Philip 公式			Kostiakov 公式		
	$R$	$R_E/\%$	RMSE/(mm·min <sup>-1</sup> )	$R$	$R_E/\%$	RMSE/(mm·min <sup>-1</sup> )	$R$	$R_E/\%$	RMSE/(mm·min <sup>-1</sup> )
最大值	0.998	7.82	0.097	0.993	9.02	0.121	0.985	10.54	0.138
最小值	0.902	2.11	0.021	0.904	2.67	0.043	0.882	1.98	0.032
平均值	0.963	4.09	0.046	0.942	7.81	0.054	0.932	8.59	0.061

注: $R$ 表示相关系数; $R_E$ 表示相对误差;RMSE表示均方根误差。

由表 2 结果可知,Horton 公式拟合结果的相关系数  $R$  平均值最高,为 0.963,Philip 公式次之,Kostiakov 公式值最小,表明 Horton 公式拟合效果最好。而 Horton 公式的相对误差  $R_E$  与均方根误差 RMSE 的平均值分别为 4.09% 与 0.046 mm/min,均为 3 个公式最小,表明 Horton 公式拟合误差最小。

分析误差产生的原因:在 Horton 公式中,参数  $k$  表示水分入渗的递减速率,计算得到壤砂土、砂壤土、粉壤土的平均  $k$  值分别为 0.056,0.046,0.039。结果表明壤砂土入渗速率递减最快,砂壤土次之,粉壤土最慢,符合实际情况,表明 Horton 公式的参数有良好的实际意义,而图 1 中的误差主要为试验误差。

由 Philip 公式拟合得到稳定入渗率  $f_c$  值,其与实测的  $f_c$  值对比如表 3 所示。可以看出在拟合得到的  $f_c$  中,共有 5 个点为负值,不符合实际情况。其余为正值,平均相对误差为 15.26%,而其中 11 号点与 15 号点均超过了 30%,与实测值相比有较大的差距。表明 Philip 公式并不适用于腰坝绿洲。

表 3 Philip 公式实测  $f_c$  值与拟合  $f_c$  值比较

试验编号	实测值/(mm·min <sup>-1</sup> )	拟合值/(mm·min <sup>-1</sup> )	$R_E/\%$
1	0.720	0.693	3.75
2	0.126	0.133	5.56
3	0.452	0.356	21.24
4	0.313	-0.277	—
5	0.433	0.369	14.78
6	0.525	-0.339	—
7	0.214	0.278	29.91
8	0.414	-0.599	—
9	0.055	-0.042	—
10	0.613	0.512	16.48
11	0.403	0.257	36.23
12	0.138	0.149	7.97
13	0.410	0.370	9.76
14	0.114	0.106	7.02
15	0.451	0.315	30.16
16	0.194	0.199	2.58
17	0.087	0.072	17.24
18	0.058	0.071	22.40
19	0.064	0.059	7.81
20	0.682	0.759	11.29
21	0.181	-0.152	—

而 Kostiakov 公式由于本身较为简单,导致拟合的结果在首尾两端往往与实测值不符。由图 1 也可以看出,在初始时刻,入渗速率往往偏大,在时间较长时,入渗速率又小于稳定入渗率,不符合实际情况。但在给定的时间长度内,该公式使用较为简便及精确。若需更广泛的应用,还需对公式作进一步的改善。例如 Lewis 在 Kostiakov 公式的基础上,引入了  $f_c$ ,提出了 Kostiakov 公式的三参数形式,适用范围则更广泛。

综合来看,Horton 公式拟合精度要优于 Philip 公式与 Kostiakov 公式,式中的参数有良好的实际意义,可被用来描述当地土壤水分入渗过程。

## 2.2 土壤参数对入渗过程的影响

土壤水分入渗过程受到土壤质地、容重、初始含水率、地下水位及入渗时间等多因素综合影响,在本次试验过程中,由于地下水位普遍大于 10 m,同时所有试验点采用统一入渗时间,可忽略地下水位及入渗时间对试验的影响,因而主要影响因素为土壤参数。利用 SPSS 软件分析试验数据可知,土壤质地对入渗过程具有显著性影响,其决定系数  $R^2$  高达 0.89,而土壤容重及初始含水率对入渗过程的影响则相对较小,且是基于同一土壤质地基础之上,下面具体讨论各个参数对入渗过程的影响。

**2.2.1 土壤质地** 为了定量研究不同质地土壤对入渗过程的影响,分别统计了壤砂土、砂壤土、粉壤土的野外试验实测初始入渗率  $f_0$ ,稳定入渗率  $f_c$  及稳定入渗时间  $t$  的分布,如表 4 所示。由于野外所有点观测时间均为 150 min,在作出入渗速率图后,假定若 10 min 内入渗速率相差小于 0.01 mm/min,即认为达到稳定入渗。

由表 4 中数据可以看出,不同质地土壤入渗规律差异较大,以初始入渗率为例,最大的壤砂土入渗速率为 2.218 mm/min,而最小的粉壤土仅为 0.144 mm/min。总体上初始入渗率与稳定入渗率均随土壤中含砂量的降低而降低,说明随着土壤结构由疏松变密实,其入渗能力也变差。

表 4 不同质地土壤入渗参数

统计值	壤砂土			砂壤土			粉壤土		
	$f_0/$ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$f_c/$ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$t/$ min	$f_0/$ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$f_c/$ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$t/$ min	$f_0/$ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$f_c/$ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$t/$ min
最大值	2.218	0.720	88	1.188	0.452	104	0.718	0.138	128
最小值	1.192	0.414	45	0.914	0.181	73	0.144	0.055	89
平均值	1.723	0.550	68	1.004	0.295	79	0.464	0.092	101

注： $f_0$  为初始入渗率； $f_c$  为稳定入渗率； $t$  为稳定入渗时间。下同。

稳定入渗时间则随土壤中含砂量的减少而增加，由图 1 实测值曲线亦可以看出，壤砂土在试验初入渗速率快速下降，降幅较大，平均达到稳定入渗仅需 68 min；砂壤土入渗速率降幅变慢，平均达到稳定入渗需 79 min；而粉壤土入渗速率变化则较慢，变化幅度较小，平均达到稳定入渗则需 101 min。

2.2.2 容重 土壤容重是反应土壤紧密程度的重要指标，主要受土壤中孔隙分布的影响，而水分入渗的实质即水分在孔隙中流动并不断深入的过程，因而容重对水分入渗过程必然存在影响<sup>[13]</sup>。按照土壤质地分类，得到累积入渗量  $I$  与容重之间的关系如图 2 所示。

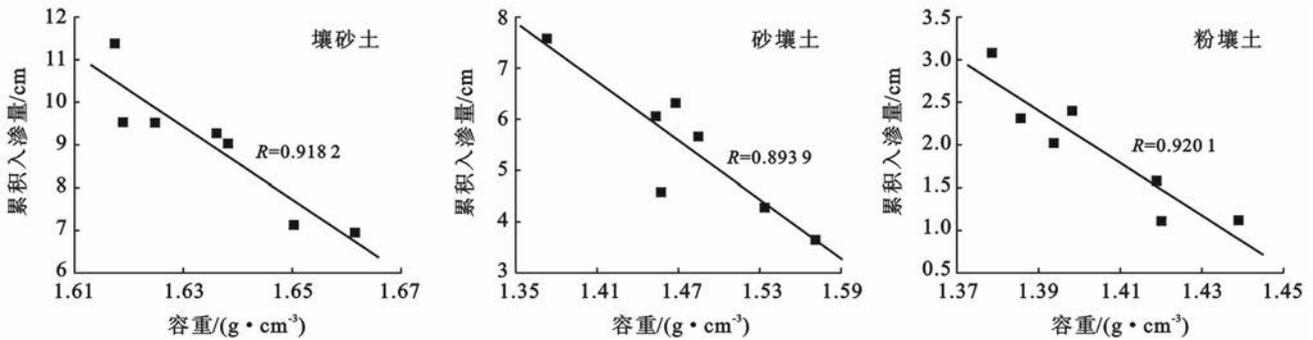


图 2 累积入渗量与土壤容重关系

由图 2 可以看出，壤砂土容重从  $1.62 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.66 \text{ g/cm}^3$ ，累积入渗量由  $11.38 \text{ cm}$  减小到  $6.95 \text{ cm}$ ；砂壤土容重从  $1.37 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.57 \text{ g/cm}^3$ ，累积入渗量由  $7.58 \text{ cm}$  减小到  $3.65 \text{ cm}$ ；粉壤土容重从  $1.38 \text{ g/cm}^3$  增加到  $1.44 \text{ g/cm}^3$ ，累积入渗量由  $3.08 \text{ cm}$  减小到  $1.11 \text{ cm}$ 。经显著性检验，结果表明容重与累积入渗量之间存在显著的线性相关关系 ( $\text{sig}_{\text{壤砂土}} = 0.004 < 0.05$ ,  $\text{sig}_{\text{砂壤土}} = 0.007 < 0.05$ ,  $\text{sig}_{\text{粉壤土}} = 0.004 < 0.05$ )，并且 3 种情况下相关系数  $R$

均大于 0.85，表明在同一质地土壤中，累积入渗量随容重增大呈减小的趋势。分析此现象原因，在同一种质地的土壤中，容重较小的孔隙较多，因此入渗能力较强，累积入渗量也较大。

2.2.3 初始含水率 土壤初始含水率是影响水分入渗过程的重要因子，对湿润锋的运移速率及稳定入渗时间都有较大影响。分别选取本次试验 3 种不同质地土壤中初始含水率最大与最小的样品，统计相关土壤入渗参数(如表 5 所示)。

表 5 不同初始含水率土壤入渗参数

参数	壤砂土初始含水率/%		砂壤土初始含水率/%		粉壤土初始含水率/%	
	18.69	13.84	15.87	9.68	15.50	9.65
$f_0/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	1.592	2.011	0.913	1.188	0.265	0.716
$t/\text{min}$	65	72	87	95	89	105
$f_c/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	0.451	0.72	0.214	0.181	0.058	0.126
$I/\text{cm}$	9.52	9.27	5.66	4.58	1.11	2.31

注： $I$  为累积入渗量。

由表 5 中 3 组对比结果可以看出，初始含水率较低的土壤，初始入渗速率远大于初始含水率较高土

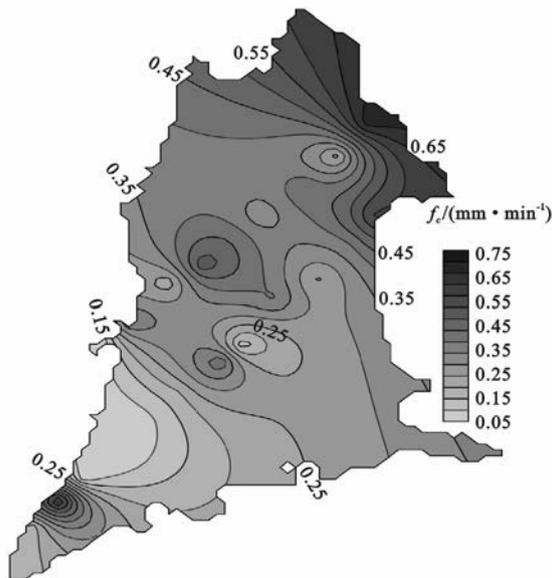
壤，平均增幅高达 36%，表明其受初始含水率影响较大；同时初始含水率较低的土壤达到稳定入渗所需时

间也相对较长,但增幅仅为 11%,表明其受初始含水率影响相对较小。因为在入渗初期,土壤水分处于非饱和状态,土壤含水率越低则土水势越低,此时土壤对水分子吸引力较大,因而初始含水率越低的土壤初始入渗率则越大,达到稳定入渗所需的时间也越久。而稳定入渗率与累积入渗量则并未有表现出任何规律,主要是因为本次试验之前所有试验点均已处于长期未灌溉状态,初始含水率普遍较低且差距不大,并且试验时并未刻意去控制其他变量,因而初始含水率对入渗过程的影响主要表现在影响初始入渗率上,而对最终稳定含水率及累积入渗量则影响不大。

表 6 入渗率的统计特征值

入渗率	样本容量	最大值	最小值	平均值	方差	变异系数	偏态系数
$f_0/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	21	2.218	0.144	1.080	0.349	0.547	1.612
$f_c/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	21	0.720	0.055	0.317	0.046	0.677	4.459

由表 6 中数据可以看出初始入渗率与稳定入渗率均表现出较大的空间变异性。其最大值分别约为最小值的 16 与 12 倍;变异系数分别为 0.547 与 0.677,属于中等强度变异;偏态系数分别为 1.612 与 4.459,均表现出正偏趋势。为了更加直观描述入渗率在空间上的分布情况,利用 Kriging 内插值法绘制稳定入渗率在研究区内的等值线图(如图 3 所示)。

图 3 研究区稳定入渗率  $f_c$  空间分布

由图 3 结果可以明显看出,总体上稳定入渗率东部较西部高,北部较南部高,即沿试验线布设方向入渗率呈逐步减小趋势,具有较强的空间变异性。中西部个别点入渗率较大,主要是由于该点处土壤含砂量较高,分析其原因。中部地区主要是受耕作影响,个

### 2.3 入渗率的空间变异性分析

腰坝绿洲处于山前倾斜洪积平原的中下部地区,沉积物由不同时期洪积扇重叠堆积而成,由山前向西沉积物颗粒逐渐变细。

根据颗粒分析试验结果可以看出,土壤中砂含量由东向西有减少的趋势,为了研究试验区内入渗率的空间分布情况,利用地统计学方法对入渗率数据进行分析,将土壤入渗参数视为相互独立随机变量,分别计算初始入渗率  $f_0$  与稳定入渗率  $f_c$  样本的均值、方差、标准差、变异系数及偏态系数,得到相应的结果如表 6 所示。

别农户为了耕作需要引入砂土;而西部地区如 20 号点则是由于位于腰坝绿洲最西边,紧邻腾格里沙漠,土地沙化现象严重。综合来看,入渗率的空间分布主要受洪积扇堆积物影响,呈现出由东北向西南逐步减小的趋势,但在局部地区会受农业耕作及周边环境影响。

## 3 结论

(1) 通过拟合结果可以看出,Horton 公式拟合结果的相关系数平均值高达 0.963,相对误差与均方根误差分别仅为 4.09% 与 0.046 mm/min,表明 Horton 公式的拟合精度要好于 Philip 公式与 Kostakov 公式。且 Horton 公式的参数有较好的物理意义,符合实际情况,说明 Horton 公式可被用于描述腰坝绿洲土壤水分入渗过程。

(2) 通过多元回归及地统计学分析可以发现,土壤水分入渗过程受土壤性质差异影响较大,其中受土壤质地差异影响尤为显著;同时入渗率存在较强空间变异性,稳定入渗率最大值为最小值的 12 倍,变异系数高达 0.677,空间分布主要受洪积扇堆积物分布影响,呈现出由东北向西南递减的趋势。

### [ 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,2006:126-128.
- [2] 刘芝芹,郎南军,彭明俊,等.金沙江流域典型森林土壤水分入渗特征试验研究[J].水土保持通报,2014,34(2):43-47.

### 3 结论

(1) 腰坝绿洲土壤盐渍化的空间变异性较大, 0—10 cm 的土层中的全盐量和盐离子含量普遍较 10—60 cm 土层中的含量高, 土层中的盐离子主要发生聚盐过程, 脱盐过程不明显。腰坝绿洲全区 pH 平均值大于 8, 试验中监测出的  $\text{CO}_3^{2-}$  含量微妙, 监测出的  $\text{HCO}_3^-$  与总碱度呈显著正相关, 证明该区盐渍土壤正发生着盐化和碱化的双重特性。

(2) 离子相关性分析结果中, 0—10 cm 土层中  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  均有极显著正相关 ( $p=0.977$ )。而 10—60 cm 土层中,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  均有显著的正相关关系 ( $p>0.90$ ), 说明了  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$  是土壤中主要的影响因子, 土壤的盐渍土类型是以硫酸型盐渍土和氯化型盐渍土为主, 该类盐渍土严重破坏了土壤的理化性质, 土壤性质向继续恶化的方向发展, 对作物有严重的毒害作用。经调查灌区主要种植玉米, 耐盐性能差, 无论对作物产量而言还是土地改良都是不利的。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.
- [2] 田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21 世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 177-181.
- [3] 任加国, 郑西来, 许模, 等. 新疆叶尔羌河流域土壤盐渍化特征研究[J]. 土壤, 2005, 37(6): 635-639.
- [4] 李素英, 李晓兵, 符娜, 等. 内蒙古典型草原区土壤硬度

与土壤水分的空间变化分析: 以锡林浩特为例[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 196-202.

- [5] 薛风海. 我区西部牧区井灌饲草料基地的土壤盐碱化问题研究: 阿盟腰坝灌区调查[J]. 内蒙古水利, 1986(4): 20-24.
- [6] 姜凌, 李佩成, 胡安焱, 等. 干旱区绿洲土壤盐渍化分析评价[J]. 干旱区地理, 2009, 32(2): 234-239.
- [7] 刘贯群. 内蒙李井灌区地下水数值模拟及土壤盐渍化预报[D]. 山东 青岛: 青岛海洋大学, 2002.
- [8] 马成霞, 丁建丽, 杨爱霞, 等. 绿洲区域土壤盐渍化主要参数的空间异质性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2): 144-150.
- [9] 毛任钊, 田魁祥, 松本聪, 等. 盐渍土盐分指标及其与化学组成的关系[J]. 土壤, 1997, 29(6): 326-330.
- [10] 卢磊, 乔木, 周生斌, 等. 新疆渭干河流域土壤盐渍化及其驱动力分析[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(3): 357-361.
- [11] 鲁如坤, 陈怀满, 周建民. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 85-96.
- [12] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 61-66.
- [13] 贾艳红, 赵传燕, 南忠仁. 黑河下游地下水波动带土壤盐分空间变异特征分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(3): 379-388.
- [14] 石迎春, 辛民高, 郭娇, 等. 西北地区黑河中游盐渍化地区土壤盐分特征[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 28-37.
- [15] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 银川平原不同类型盐渍化土壤酶活性及其与土壤养分间相关分析研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, (7): 121-126.

(上接第 151 页)

- [3] Duan Runbin, Fedler C B, Borrelli J. Field evaluation of infiltration models in lawn soil[J]. Irrigation Science, 2011, 29(5): 379-389.
- [4] 宋小帅, 康峰峰, 韩海荣, 等. 辽河源典型森林类型的土壤水文效应[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 101-105.
- [5] 肖庆礼, 黄明斌, 邵明安, 等. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入渗与再分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 124-131.
- [6] 武敏, 冯绍元, 孙春燕, 等. 北京市大兴区典型土壤水分入渗规律田间试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(4): 98-102.
- [7] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil Tillage Research, 2002, 66(2): 197-205.

- [8] 姜凌, 李佩成, 胡安焱, 等. 内蒙古阿拉善腰坝绿洲地下水水化学特征[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 105-110.
- [9] 朱良军, 张光辉, 任宗萍. 4 种土壤入渗测定方法的比较[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 163-168.
- [10] 周鑫洋, 王仰仁, 刘群昌. 四个人渗公式对农田潮土的适应性研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(8): 96-100.
- [11] 徐海芳, 刘恩民, 郑丽萍. 农田土壤表层入渗指数的空间相关性研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(11): 11-13.
- [12] 聂卫波, 武世亮, 马孝义, 等. 农田土壤入渗特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 31-37.
- [13] 赵文举, 郁文, 范严伟, 等. 滴灌条件下容重对压砂土壤水分入渗规律的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 169-173.