

农田土壤入渗特性研究

聂卫波¹, 武世亮², 马孝义², 费良军¹

(1. 西安理工大学水资源研究所, 陕西 西安 710048; 2. 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: 以陕西杨凌一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土所选典型田块的双环入渗试验为基础, 对不同土壤质地条件下的土壤入渗特性进行了研究。结果表明: 两种土壤质地条件下描述其入渗过程的最优入渗公式为修正 Kostiakov 公式; 土壤入渗试验合理的设计观测时间一级阶地砂壤土条件下不应小于 90 min, 三级阶地粘壤土条件下不应小于 120 min; 根据各入渗参数的最大相关距离, 计算了典型田块入渗试验的合理测点数, 一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土试验田块均为 42 个测点; 可在一定程度上借助稳定入渗率 f_0 的变异特征描述土壤入渗性能和衡量土壤入渗能力, 但同时还应考虑入渗参数 k 的空间变异特征。

关键词: 土壤入渗; 入渗公式; 入渗时间; 合理测点数

中图分类号: S152.7+2 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)04-0031-07

Research on the soil infiltration characteristics in the field

NIE Wei-bo¹, WU Shi-liang², MA Xiao-yi², FEI Liang-jun¹

(1. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the double-ring infiltration experiments carried out in the selected fields of the first terrace and the third terrace with sandy loam and clay loam respectively in Yangling District, Shaanxi Province, China, the soil infiltration characteristics under different soil textures were studied. The results showed that the modified Kostiakov function was the optimal choice in describing the process of soil infiltration. The reasonable observing time of infiltration experiment was no less than 90 min in the first terrace with sandy loam and no less than 120 mins in the third terrace with clay loam. Based on the maximum correlation distance among the infiltration parameters, the reasonable sampling number was proved to be 42 for the selected fields in both the first terrace and the third terrace. The spatial variation characteristics of basic infiltration rate f_0 could be employed to describe the infiltration performance and to measure the infiltration capacity of soil, and the spatial variation characteristics of the infiltration parameter k should also be taken into consideration. The study results could set the scientific foundation for a further study of soil infiltration characteristics.

Keywords: soil infiltration; infiltration function; infiltration time; reasonable sampling number

土壤入渗特性是进行地面灌溉设计的重要基础, 同时也是水文转换、土壤侵蚀和养分迁移等领域研究的热点。国内外学者对其进行了大量研究, 如 Schwankl 等^[1]研究了沟灌条件下土壤的入渗特性, 结果表明可采用较短时间的入渗过程预测较长时间的土壤入渗信息; 解文艳等^[2]研究了土壤质地对其入渗能力的影响, 结果表明土壤质地由轻变重, 土壤入渗能力逐渐减小; 武敏等^[3]研究了 3 种土壤质地

的土壤水分入渗规律, 结果表明入渗过程达到稳定的时间由快到慢依次为壤质砂土、砂质壤土和粉砂壤土; 马娟娟等^[4]采用数值模拟的方法研究了蓄水坑灌条件下的土壤水分运移规律, 结果表明所建模型具有较高精度; 张治伟等^[5]研究了岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能, 结果表明灌丛和经营多年的果园土壤入渗性能最好, 其次为草地, 旱地土壤入渗性能最差; Duan 等^[6]研究了不同入渗公式对于草

收稿日期: 2012-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209171); 陕西省自然科学基金项目(2010JQ7010); 陕西省教育厅科研计划项目(11JK0640); 西安理工大学博士科研启动金; 中国博士后科学基金资助项目; 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目资助(106-00X101, 106-5X1205)

作者简介: 聂卫波(1981—), 男, 陕西周至人, 博士, 讲师, 主要从事农业水土工程方面研究。E-mail: nwbo2000@163.com。

通讯作者: 马孝义(1965—), 男, 陕西凤翔人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程方面研究。Email: xiaoyimasl@yahoo.com.cn。

地的适用性,结果表明修正 Kostiakov 公式和 Horton 公式的拟合效果最优,而 Philip 公式和 Kostiakov 公式等效果较差;张新燕等^[7]研究了沟灌条件下的土壤入渗特性,结果表明灌水沟中水深、沟底宽、湿周对沟灌入渗过程均有明显影响。虽然以往研究取得了较多成果,但大多集中在土壤入渗机理和数值模拟等方面,较少考虑土壤入渗特性的空间变异特征。近年来,许多学者的研究表明,土壤入渗特性的空间变异是客观存在的,有必要通过农田内多点的土壤入渗试验,研究其空间变异规律^[8-10]。众所周知,土壤入渗试验费时费力,这给试验工作造成了较大的困难。因此,如何有效减少试验工作量,但又能满足试验可靠性和精度要求,就成为亟待解决的问题。基于此,本文以陕西杨凌一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土所选典型田块双环入渗试验为基础,结合统计学和地统计学理论,通过分析典型田块各测点的土壤入渗过程和空间结构函数,确定不同土壤质地条件下合理的试验观测时间和测点数,以及可表征土壤入渗性能入渗参数,以期为进一步认识农田土壤入渗特性奠定科学基础。

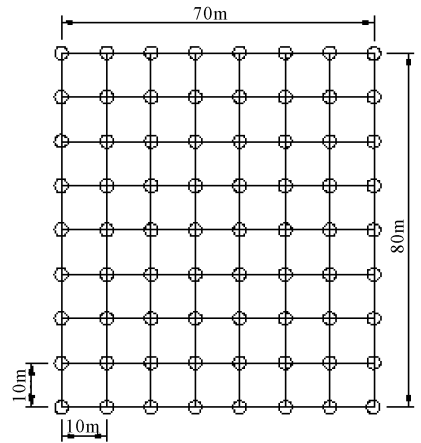
1 材料与方 法

1.1 研究区概况

陕西杨凌属于大陆季风性气候,地处典型的半干旱、半湿润气候区,多年平均降水量略大于 600 mm,蒸发量 1 100 mm 左右。区域地势南低北高,从南至北依次分布三级阶地:其中一级阶地以砂壤土为主,二、三级阶地高差较大,以粘壤土为主。

根据杨凌土壤质地的分布情况,在一级阶地和三级阶地各选取长 80 m、宽 70 m 的典型田块进行土

壤双环入渗试验,均按照 10 m×10 m 的网格布设测点,各田块共布置 72 个试验点,具体见图 1。同时在各测点周围取土样,分别测定各点土壤容重、含水率和土壤颗粒组成等土壤特性参数。



注:图中○为双环入渗试验点

Note: ○ stands for infiltration test sites

图 1 田间土壤入渗试验点布置

Fig.1 Soil infiltration test sites in the field

1.2 试验方法

土壤入渗特性用野外双环入渗仪测定,入渗环内地表水位用马氏瓶控制在 5 cm,入渗过程中记录入渗时间和累积入渗量,各点观测时间为 180 min;初始含水量用烘干法测定,土壤容重用体积为 100 cm³ 的环刀取原状土,同样采用烘干法测定;用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行土壤颗粒分析,按照中国土壤质地分类标准,供试土壤质地分别为粘壤土和砂壤土;利用 GPS 定位仪测定各田块经、纬度值。各田块的基本土壤特性参数见表 1。

表 1 各试验田块土壤特性参数

Table 1 The soil characteristic parameters in two different experiment fields

试验地点 Experiment fields	经度 Longitude	纬度 Latitude	土壤质地 Soil texture	各粒径土壤的质量分数/% Mass fraction of soil particles			容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	含水率 Moisture content /%
				粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand		
一级阶地 First terrace	108°05'29"	34°14'51"	砂壤土 Sandy loam	1.93	30.76	67.31	1.38	16.94
三级阶地 Third terrace	108°03'30"	34°17'33"	粘壤土 Clay loam	24.15	45.41	30.44	1.30	14.65

注:表中各粒径土壤的质量分数、容重和含水率分别为各阶地所有测点平均值。

Note: The data of mass fraction of soil particles, bulk density and moisture content are the mean values of all test sites in each terrace.

2 土壤入渗模型

描述土壤水分入渗过程和入渗性能的公式较多,经验性的主要有 Kostiakov 公式、修正 Kostiakov

公式和 Horton 公式等;半理论半经验性的有 Philip 公式和 Green-Ampt 公式等。但不同入渗公式都具有其适用性,本文选取 Kostiakov 公式、修正 Kostiakov 公式和 Philip 公式作为研究对象。其中 Kostiakov 公

式可采用下式表示:

$$I = kt^a \quad (1)$$

式中, I 为单位面积累积入渗量 (cm); t 为入渗时间 (min); k 为入渗系数, 表示第一单位时间末的入渗速度 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); a 为入渗指数。但当入渗时间趋向无穷大时, Kostiakov 公式计算结果与实际情况差距较大, 故对其进行完善, 得到修正 Kostiakov 公式, 即

$$I = kt^a + f_0 t \quad (2)$$

式中, f_0 为稳定入渗率 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); 其余符号意义同前。

Philip 公式能够较好地描述均质土壤短历时条件下的一维入渗过程, 其公式如下:

$$I = St^{1/2} + At \quad (3)$$

式中, S 为土壤吸渗率 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5}$); A 为稳定入渗率 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); 其余符号意义同前。

表2 各田块不同入渗公式拟合结果比较

Table 2 The comparison of fitting results with different infiltration functions in each field

统计值 Statistic value	一级阶地 First terrace						三级阶地 Third terrace					
	Kostiakov 公式 Kostiakov equation		修正 Kostiakov 公式 Modified Kostiakov equation		Philip 公式 Philip equation		Kostiakov 公式 Kostiakov equation		修正 Kostiakov 公式 Modified Kostiakov equation		Philip 公式 Philip equation	
	R^2	RSM/cm	R^2	RSM/cm	R^2	RSM/cm	R^2	RSM/cm	R^2	RSM/cm	R^2	RSM/cm
最小值 Min.	0.8484	0.045	0.9796	0.012	0.8734	0.015	0.8375	0.037	0.9738	0.025	0.8367	0.031
最大值 Max.	0.9890	0.483	0.9999	0.179	0.9910	0.261	0.9981	0.168	0.9996	0.109	0.9995	0.282
均值 Mean	0.8817	0.124	0.9976	0.054	0.9162	0.094	0.9250	0.103	0.9935	0.065	0.8856	0.116
排序 Rank	3		1		2		2		1		3	

由表2可知, 一级阶地砂壤土条件下, 采用修正 Kostiakov 公式拟合各测点的相关系数 R^2 均值最高, 为 0.9976, 所有测点均方根误差 RMS 均值最小, 为 0.054 cm; 其次为 Philip 公式, Kostiakov 公式拟合效果最差; 三级阶地粘壤土条件下, 采用修正 Kostiakov 公式拟合的精度最高, 其所有测点相关系数 R^2 和均方根误差 RMS 均值分别为 0.9935 和 0.065 cm, 其次为 Kostiakov 公式, Philip 公式拟合效果最差。由此可知, 杨凌一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土条件下, 采用修正 Kostiakov 公式描述土壤水分入渗过程效果最优。但该结论与屈金娜^[11]的研究有所差异, 其原因为文献[11]中土壤入渗观测时间较短, 各测点均为超过 40 min, 而研究表明对于短历时条件下, Philip 公式有着较好的拟合精度^[12-13]; 而对于较长历时的土壤入渗过程, 大量的研究表明不同土壤质地条件下采用修正 Kostiakov 公式描述土壤入渗过程效果最优^[6, 14-15]。

3.2 土壤入渗时间的确定

对于土壤入渗过程的测定, 通常要求入渗达到

3 结果与分析

3.1 土壤入渗公式选优

分别利用 Kostiakov 公式、修正 Kostiakov 公式和 Philip 公式对各测点入渗试验数据进行拟合。为比较各公式的拟合效果, 分别选用公式拟合的相关系数 R^2 和均方根误差 RMS 作为评价依据, 结果见表 2, 其中均方根误差 RMS 采用下式进行计算

$$RMS_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (I_{Mj} - I_{pj})^2}{N}} \quad (4)$$

式中, RMS_i 为第 i 个测点累计入渗量实测值与拟合值均方根误差 (cm); I_{Mj} 为 i 测点第 j 个时间段累计入渗量实测值 (cm); I_{pj} 为 i 测点第 j 个时间段累计入渗量拟合值 (cm); N 为各测点入渗过程的时段数。

稳定阶段后方可结束, 但不同土壤质地条件下, 土壤达到稳定入渗的时间有着明显差异, 即使相同土壤质地的不同测点, 由于土壤特性的空间变异特征, 其达到稳定入渗阶段的时间也不尽相同。本次在一级阶地和三级阶地所作入渗试验达到稳定入渗阶段的时间统计分析见表 3。

由表 3 可知, 由于土壤特性的空间变异, 导致相同田块不同测点达到稳定入渗的时间有着较大差异, 一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土条件下, 所有测点达到稳定入渗的时间均值分别为 72 min 和 98 min, 其变异系数分别为 0.4328 和 0.3976, 均为中等变异。而本次试验所有测点的土壤入渗时间均为 180 min, 均达到了稳定入渗。但由于试验时间过长, 无疑增加了试验的工作量, 若能选取较为合理的土壤入渗时间, 将可在一定程度上减少试验工作量。基于此, 采用修正 Kostiakov 公式分别对各测点前 30、60、90 min 和 120 min 时间段的入渗数据进行拟合, 得出各时间段的入渗参数, 在此基础上, 利用所得入渗参数推求各测点 180 min 的累计入渗量, 并

将其与实测值进行比较,比较结果见图 2,由于篇幅有限,仅以一级阶地砂壤土为例,以确定各田块合理

的土壤入渗时间。

表 3 各田块不同测点达到稳定入渗阶段的时间的统计特征

Table 3 Statistical results of the time when infiltration become steady in different sites of each field

试验地点 Experiment fields	土壤质地 Soil texture	最小值 Min. (min)	最大值 Max. (min)	均值 Mean (min)	变异系数 Coefficient of variation
一级阶地 First terrace	砂壤土 Sandy loam	35	120	72	0.4328
三级阶地 Third terrace	粘壤土 Clay loam	55	140	98	0.3976

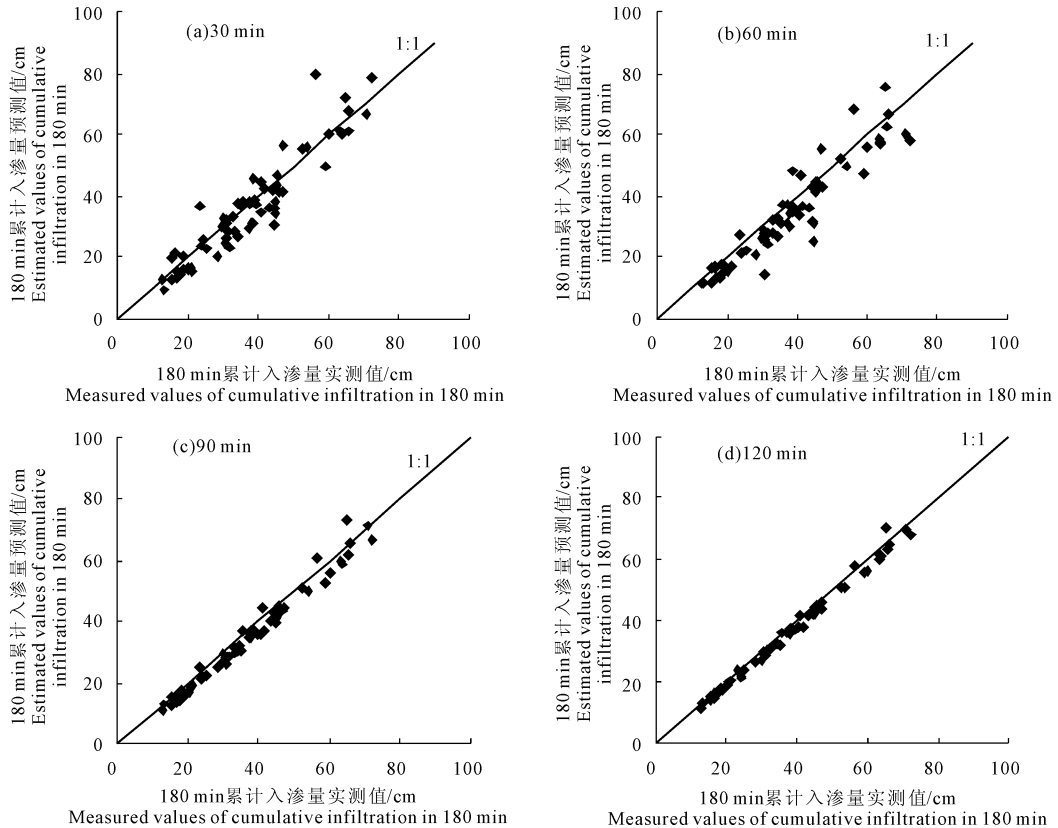


图 2 一级阶地各测点不同时间段所得入渗参数推求 180 min 累计入渗量预测值与实测值比较

Fig.2 Comparison of the estimated values of cumulative infiltration in 180 min deduced by infiltration parameters obtained at various stages with the measured values in the first terrace

由图 2 可见,一级阶地砂壤土条件下,各测点基于前 30 min 和 60 min 入渗数据所得入渗参数推求的 180 min 累计入渗量预测值与实测值一致性较差,经显著性检验,其结果显示两组预测值均与实测值有显著性差异 ($Sig_{30min} = 0.002 < 0.05$, $Sig_{60min} = 0.008 < 0.05$);而各测点基于前 90 min 和 120 min 入渗数据所得入渗参数推求的 180 min 累计入渗量预测值与实测值一致性较高,经显著性检验,其结果显示两组预测值均与实测值无显著性差异 ($Sig_{90min} = 0.279 > 0.05$, $Sig_{120min} = 0.318 > 0.05$)。由此表明,采用前 30 min 或 60 min 所得入渗参数预测 180 min 累积入渗量存在较大误差,不能很好地描述土壤长

历时的入渗过程,而采用前 90 min 或 120 min 所得入渗参数可较好地描述土壤长历时的入渗过程,且可确保大多数测点可到达稳定入渗阶段。但考虑试验工作量,推荐在杨凌一级阶地砂壤土条件下,土壤入渗试验观测时间不应小于 90 min。采用相同方法,可得杨凌三级阶地粘壤土条件下,土壤入渗试验观测时间不应小于 120 min,其所需观测时间大于砂壤土,这与已有文献的研究成果相一致^[16]。

3.3 合理测点数的确定

由于土壤空间变异性的特点,测点的数目不宜过少,过少则精度达不到要求,甚至产生错误的规律,过多则需消耗大量的人力物力,这就提出了确定

合理测点数的问题。以往对于该问题的研究,通常以传统统计学为基础来确定合理的测点数,但传统统计学认为各测点的入渗特征与空间位置无关,即在空间上独立的^[17-18]。而研究表明,土壤特性是一种区域化变量,在一定距离内,各测点的土壤特性并非完全独立于邻近的测点,而是具有一定的相关性,呈现出一定的空间结构,可用半方差函数表示^[19-20]。半方差函数是地统计学的理论核心,通过测定区域化变量分隔等距离的样点间的差异来研

究区域化变量的空间结构,可采用下式表示

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

式中, h 为相关距离; $\gamma(h)$ 为 h 的变差函数值; $N(h)$ 为相关距离为 h 时的样本对数; $Z(x_i)$ 为采样点 x_i 的土壤特征值。采用 GS 软件对本次一级阶地和三级阶地典型田块土壤入渗特性的半方差函数进行拟合,其基本参数见表 4。

表 4 土壤入渗特性半方差函数的基本参数

Table 4 The semi-variogram parameters of the soil infiltration characteristics

试验地点 Experiment fields	入渗参数 Infiltration parameters	C_0	$C_0 + C$	$C_0/(C_0 + C)$ /%	相关距离/m Correlation distance	拟合函数 Fitting model
一级阶地 First terrace	k	0.090	0.294	30.61	14.80	球状函数 Spherical model
	a	0.005	0.013	38.46	14.70	指数函数 Exponential model
	f_0	0.011	0.031	35.48	13.79	指数函数 Exponential model
	Z_{180}	22.50	83.00	27.11	13.20	指数函数 Exponential model
三级阶地 Third terrace	k	0.171	0.476	35.92	15.62	指数函数 Exponential model
	a	0.024	0.065	36.92	15.85	球状函数 Spherical model
	f_0	0.162	0.414	39.13	12.84	指数函数 Exponential model
	Z_{180}	0.800	2.576	31.06	13.45	指数函数 Exponential model

注: C_0 为块金值, $C_0 + C$ 为基台值, Z_{180} 为 180 min 累计入渗量。

Note: C_0 is nugget value, $C_0 + C$ is partial sill, and Z_{180} is cumulative infiltration in 180 min.

表 4 中 $C_0/(C_0 + C)$ 值表示系统变量的空间相关性程度(随机部分引起的空间变异性占系统总变异的比例),其值小于 0.25,说明变量具有强烈的空间相关性;其值在 0.25 ~ 0.75 之间,说明变量具有中等的空间相关性;若大于 0.75,说明变量空间相关性很弱^[21]。由此可知,一级阶地和三级阶地典型田块土壤入渗参数均呈现出较为明显的空间相关性,其空间变异主要由结构性因素引起的,而随机部分所起作用相对较弱,这也进一步说明了采用传统统计学确定最小样本数的不合理性。由表 4 可看出,一级阶地砂壤土条件下,土壤入渗参数 k 的最

优半方差函数为球状函数,其最大相关距离为 14.80 m,其余参数 a 、 f_0 和 Z_{180} 均为指数函数,最大相关距离分别为 14.70、13.79 m 和 13.20 m;三级阶地粘壤土条件下,土壤入渗参数 a 的最优半方差函数为球状函数,其最大相关距离为 15.85 m,其余参数 k 、 f_0 和 Z_{180} 均为指数函数,最大相关距离分别为 15.62、13.10 m 和 13.45 m。

根据各参数的最大相关距离并根据实际情况作相应调整,按正方形网格布设测点,对一级阶地和三级阶地典型田块合理测点数进行确定,结果见表 5。

表 5 基于地统计学方法的各田块合理测点数

Table 5 The reasonable sampling number based on geostatistics

试验地点 Experiment fields	k		a		f_0		Z_{180}	
	调整距离 Adjusted distance/m	测点数 Sampling number	调整距离 Adjusted distance/m	测点数 Sampling number	调整距离 Adjusted distance/m	测点数 Sampling number	调整距离 Adjusted distance/m	测点数 Sampling number
一级阶地 First terrace	14.50	30	14.50	30	13.50	36	13.00	42
三级阶地 Third terrace	15.50	30	15.50	30	12.50	42	13.00	42

由表 5 可知,相同田块中根据不同入渗参数所求合理测点数不同,原因为各参数的最大相关距离

有所差异,为了能准确代表整个田块土壤入渗的空间变异特征,其合理测点数应根据不同参数所得测

点数的最大值进行取值,即一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土试验田块均为 42 个测点。

3.4 土壤入渗参数间的相关性分析

土壤入渗特性具有明显的空间变异性,通过分析各入渗参数之间的相关性,找出可客观反映田间

土壤入渗性能的土壤入渗参数,则有助于今后对土壤入渗特性空间变异特征的研究。因此,采用 SPSS 软件分析典型田块各测点土壤入渗参数间的互相关系数,结果见表 6。

表 6 不同土壤入渗参数的互相关系数

Table 6 Cross-correlation coefficients of different infiltration parameters

试验地点 Experiment fields	$k \times a$	$k \times f_0$	$k \times Z_{180}$	$a \times f_0$	$a \times Z_{180}$	$f_0 \times Z_{180}$
一级阶地 First terrace	-0.112	-0.210	0.481*	0.031	0.203	0.709**
三级阶地 Third terrace	-0.109	-0.178	0.452*	0.078	0.148	0.788**

注:相关显著性检验,**表示显著水平 $P \leq 0.01$; *表示显著水平 $P \leq 0.05$ 。

Note: ** and * mean significance of correlation at $P \leq 0.01$ and $P \leq 0.05$ respectively.

由表 6 可知,土壤入渗参数 f_0 与 Z_{180} 之间在各田块均显示出很强的相关性,其相关系数在一级阶地和三级阶地分别为 0.709 和 0.788,显著水平均达到 0.01;入渗参数 k 与 Z_{180} 之间在各田块的入渗试验中同样也显示出一定的相关性,但其相关系数较低,一级阶地和三级阶地分别为 0.481 和 0.452,显著水平为 0.05;而入渗参数 a 与 Z_{180} 之间几乎无相关关系;其原因为:当入渗过程达到稳定阶段以后,稳定入渗率 f_0 是影响入渗的主要因素,在一定程度上影响最终累计入渗量的大小(由表 3 可知,所有测点均达到稳定入渗),故 f_0 与 Z_{180} 的关系最为密切;而在入渗初期,入渗参数 k 对入渗开始阶段的入渗量有着明显影响,通常情况当入渗参数 a 相对稳定时, k 值越大其入渗初期入渗量越大,反之则越小,故 k 与 Z_{180} 之间呈现一定的相关关系;对于入渗参数 a 而言,其表示土壤入渗衰减程度,其值越大,表示土壤入渗速率衰减越慢,则累计入渗量越大,反之则土壤入渗速率衰减越快,累计入渗量越小,但对于相同质地的田块而言,当初始条件基本相同的情况下,入渗参数 a 相对稳定(对试验数据分析表明,两个田块中入渗参数 a 的空间变异程度最低,一级阶地田块变异系数为 0.287,三级阶地为 0.245),故 a 与 Z_{180} 呈现出低的相关性。由上述分析可知,稳定入渗率 f_0 和 Z_{180} 间存在强烈相关性,因此可在一定程度上借助稳定入渗率 f_0 的变异特征描述土壤入渗性能和衡量土壤入渗能力,但同时还应考虑入渗参数 k 空间变异特征。

4 结 论

以陕西杨凌一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土所选典型田块的土壤双环入渗试验为基础,对不同质地条件下的土壤入渗特性进行了研究,得到以下

结论:

1) 通过比较不同入渗公式描述各测点的入渗过程,结果表明两种土壤质地条件下最优入渗公式为修正 Kostiakov 公式;其中一级阶地砂壤土条件下的拟合效果为:修正 Kostiakov 公式 > Philip 公式 > Kostiakov 公式;三级阶地粘壤土条件下为:修正 Kostiakov 公式 > Kostiakov 公式 > Philip 公式。

2) 通过分析典型田块基于前 30、60、90 min 和 120 min 所得入渗参数推求各测点 180 min 累计入渗量预测值与实测值的显著性,提出了杨凌一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土条件下,土壤入渗试验合理的设计观测时间分别不应小于 90 min 和 120 min。

3) 以地统计学理论为基础,采用 GS 软件对典型田块土壤入渗特性空间结构进行了拟合,得出了典型田块土壤入渗参数的半方差函数;根据各入渗参数的最大相关距离,计算了典型田块入渗试验的合理测点数,即一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土试验田块均为 42 个测点。

4) 通过分析土壤入渗参数间的相关性分析,结果表明稳定入渗率 f_0 和 Z_{180} 间存在强烈相关性,因此可在一定程度上借助稳定入渗率 f_0 的变异特征描述土壤入渗性能、衡量土壤入渗能力,但同时还应考虑入渗参数 k 空间变异特征。

参 考 文 献:

- [1] Schwankl L J, Raghuvanshi N S, Wallender W W. Time series modeling for predicting spatially variable infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2000, 126(5): 283-287.
- [2] 解文艳,樊贵盛.土壤质地对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004, 35(5): 537-540.
- [3] 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.

- [4] 马娟娟,孙西欢,郭向红,等.蓄水多坑入渗条件下土壤水分运动建模与试验[J].农业机械学报,2010,41(3):46-51.
- [5] 张治伟,朱章雄,王燕,等.岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J].农业工程学报,2010,26(6):71-76.
- [6] Duan R, Fedler C B, Borrelli J. Field evaluation of infiltration models in lawn soils[J]. *Irrig Sci*, 2011,29(5):379-389.
- [7] 张新燕,蔡焕杰,朱德兰.沟灌条件下灌水沟入渗特性研究[J].中国农村水利水电,2012,(3):7-11.
- [8] Zapata N, Playan E. Elevation and infiltration in a level basin. I. Characterizing variability[J]. *Irrig Sci*, 2009,19(4):155-164.
- [9] Zapata N, Playan E. Elevation and infiltration in a level basin. II. Impact on soil water and corn yield[J]. *Irrig Sci*, 2009,19(4):165-173.
- [10] 白美健.微地形和入渗时空变异及其对畦灌系统影响的二维模拟评价[D].北京:中国水利水电科学研究院,2007.
- [11] 屈金娜,马孝义,张建兴.区域尺度土壤入渗特征参数的变异性研究[J].灌溉排水学报,2009,28(1):71-73,89.
- [12] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.田间土壤水分运动参数的标定[J].水利学报,1986,17(12):1-10.
- [13] Machiwal D, Madan K J, Mal B C. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India[J]. *Biosystems Engineering*, 2006,95(4):568-582.
- [14] 康绍忠,张书函,聂光镛,等.内蒙古敖包小流域土壤入渗分布规律的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):38-46.
- [15] 李亚娟.甘肃西峰南小河流域土壤水分运动参数空间分布的试验研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [16] 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.
- [17] 杨清云,曾锋.森林土壤空间变异性及其样本容量的确定[J].水土保持研究,2004,11(3):54-56.
- [18] 徐海芳.农田土壤入渗参数的空间统计特征[D].西安:长安大学,2005.
- [19] 白美健,许迪,李益农,等.地面灌溉土壤入渗参数时空变异性试验研究[J].水土保持学报,2005,19(5):120-121.
- [20] 陈亚新,史海滨,魏占民,等.土壤水盐信息空间变异的预测理论与条件模拟[M].北京:科学出版社,2005.
- [21] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994,58(5):1501-1511.

(上接第10页)

- [6] Hartkamp A D, White J W, Rossing W A H, et al. Regional application of a cropping systems simulation model: crop residue retention in maize production systems of Jalisco, Mexico[J]. *Agricultural systems*, 2004,82:117-138.
- [7] Dzotsi K A, Jondes J W, Adiku S G K, et al. Modeling soil and plant phosphorus within DSSAT[J]. *Ecological modeling*, 2010,221:2839-2849.
- [8] Eitzinger J, Trnka M, Hosch J, et al. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during season under different soil conditions[J]. *Ecological modeling*, 2004,171:223-246.
- [9] 李军,王立祥,邵明安,等.黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究[J].作物学报,2002,28(4):555-560.
- [10] 姜志伟,武雪萍,华璐,等.洛阳旱地冬小麦生产潜力长周期定量模拟与评价[J].中国生态农业学报,2009,17(5):984-991.
- [11] 鲁向晖,穆兴民, Vinay Nangia, et al. DSSAT模型对豫西冬小麦保护性耕作效应模拟效果验证[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):64-70.
- [12] 鞠正山,张凤荣,刘晓霞.西北特干旱区农业水资源利用潜力与粮食增产的关系[J].农业工程学报,2002,18(1):177-180.
- [13] 上官周平,邵明安.西北地区粮食生产潜力与开发策略[J].科技导报,1999,9:54-55.
- [14] 汤广民,王有贞.安徽淮北平原主要农作物的优化灌溉制度与经济灌溉定额[J].灌溉排水学报,2006,25(2):24-29.
- [15] 张喜英,裴冬.不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J].水利学报,2001,(1):90-95.
- [16] Tsuji G Y. DSSAT4.0 User's Guide. Vol.1-4[Z]. Hawaii State: The university of Hawaii, 2003.
- [17] Godwin D. A user's guide to CERES-Wheat V210[M]. State of New York: International Fertilizer Development Center, 1990.
- [18] Trimsina J, Godwin D, Humphreys E, et al. Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the DSSAT - CSM - CERES - Wheat model[J]. *Agricultural water management*, 2008,95:1099-1110.
- [19] 陕西省土壤普查办公室.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992.
- [20] Jianqiang He, James W Jones, Wendy D Graham, et al. Influence of likelihood function choice for estimating crop model parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method[J]. *Agricultural Systems*, 2010,103:256-264.
- [21] 刘浩,段爱旺,高阳.间作种植模式下冬小麦棵间蒸发变化规律及估算模型研究[J].农业工程学报,2006,22(12):34-38.
- [22] 刘昌明,周长青,张士锋,等.小麦水分生产函数及其效益的研究[J].地理研究,2005,24(1):1-10.
- [23] 王会肖,刘昌明.作物水分利用效率内涵及研究进展[J].水科学进展,2000,11(1):99-104.
- [24] 龙爱华,徐中民,张志强,等.基于边际效益的水资源空间动态优化配置研究[J].冰川冻土,2002,24(4):407-413.
- [25] 程智强,邱化蛟,程序.资源边际效益与种植业结构调整目标规划[J].农业工程学报,2005,21(12):16-19.
- [26] 刘增进,李宝萍,李远华,等.冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2004,20(4):58-63.