

杨凌区土壤入渗特性的空间变异特征研究^①

聂卫波^{1,2}, 费良军¹, 马孝义²

(1 西安理工大学水资源研究所, 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:为揭示杨凌区黏壤土区域土壤入渗特性的空间变异特征, 通过在该研究区内进行的 44 组大田土壤入渗试验为基础, 采用标定理论与地统计学相结合的方法, 对 Philip 入渗公式进行了标定, 并分析了标定因子和土壤累计入渗量的空间变异特征。结果表明: 在研究区内基于土壤稳渗率 A 计算的标定因子 a_A 标定效果最优; a_A 的变异系数为 0.257 5, 属于中等变异强度, 且服从对数正态分布; a_A 的空间变化呈现二阶趋势, 块金值与基台值的比值为 0.228 0, 表明其具有强烈的空间相关性。普通 Kriging 插值结果显示所有测点的 a_A 和 90 min 累计入渗量空间分布特征具有高的一致性, 并在此基础上, 将 a_A 和 30 min、60 min、90 min 累计入渗量预测值与实测值进行了比较, 其两者的误差绝对值均值分别为 12.25%、28.15%、25.56% 和 24.57%, 结合实际情况, 可认为该方法的预测结果是完全可以接受的。

关键词:土壤入渗特性; Philip 公式; 标定; 标定因子; 空间变异特征

中图分类号: S152.7

土壤入渗参数是进行地面灌溉设计的重要基础。因此, 如何准确获取土壤入渗参数一直是农业水土领域研究的热点问题。由于土壤入渗特性受到土壤结构、土壤质地和土地利用方式等因素的影响, 且具有明显的空间变异性^[1-3], 使得该问题的研究面临许多困难。为此, 众多学者采用多种方法对其进行了研究, 雷志栋和杨诗秀^[4]以及秦耀东等^[5]分别以标定理论为基础, 结合试验资料对农田尺度上的土壤入渗参数变异特征进行了研究; Rasoulzadch 和 Sepaskhah^[6]以相似理论为基础, 提出了 6 组不同沟宽条件下的土壤入渗标定公式; Machiwal 等^[7]采用标定理论, 比较了不同标定因子的土壤入渗标定结果; 徐海芳等^[8]以 Horton 入渗公式为基础, 研究了农田尺度上土壤入渗参数的空间变异特征; 贾宏伟等^[9]在石羊河流域野外土壤入渗试验的基础上, 建立了简化 Philip 入渗公式以及估算土壤入渗参数的土壤转换函数, 并分析了土壤入渗特性的空间变异特征; 屈金娜^[10]通过田间入渗试验, 采用地统计学方法研究了杨凌区土壤入渗参数的空间变异特征; 缴锡云等^[11]采用地统计学方法, 研究了农田尺度上畦灌土壤入渗参数的空间变异规律, 并分析了其变异性对灌水质量的影响。虽然这些研究取得了一定成果, 但大多集中在农田尺度上, 针对较大尺度上的研究还较少, 特别是同时考虑各向

异性和趋势效应对土壤入渗特性空间变异特征影响的研究还鲜见报道。因此, 本文选取杨凌区黏壤土区域为研究对象, 通过田间土壤入渗试验, 运用标定理论与地统计学相结合的方法, 并考虑各向异性和趋势效应, 研究该区域内土壤入渗特性的空间变异特征, 以期为该地区的地面灌溉设计提供基础。

1 研究区概况和试验方法

杨凌区属于典型的半干旱气候区, 多年平均降水量 637.6 mm, 蒸发量 884 mm。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, 海拔高差在 431 ~ 445 m 之间, 二、三级阶地海拔高差较大, 分别在 452 ~ 472 m 和 511 ~ 559 m 之间, 以黏壤土为主。根据杨凌区土壤质地的分布情况, 在二、三级阶地上选取面积约 30 km² 的区域(南北宽约 3 km, 东西长约 10 km)进行土壤入渗特性的空间变异规律研究。根据研究区域地形地貌的实际情况, 选取 44 组典型测点进行双环入渗试验, 用马氏瓶供水并控制地表水层深度。试验开始后记录各测点不同时刻的累计入渗量, 直到入渗稳定为止, 各测点重复 2 ~ 3 次, 入渗参数取平均值, 并在各测点采集土样, 测定土壤初始(质量)含水率、体积质量等参数, 根据中国土壤质地分类标准分析土壤颗粒组成; 利用

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)和中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目(106-00X101、106-5X1205)资助。

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

GPS 定位仪测定各测点经、纬度。

2 Philip 公式标定计算

2.1 基于标定理论建立的 Philip 公式

经大量的研究表明 Philip 公式形式简单,所含参数少,具有明确的物理基础,能够很好地描述均质土壤短历时条件下的一维入渗过程^[1,5,7],其公式如下:

$$I = St^{0.5} + At \tag{1}$$

式中, I 为单位面积上的累计入渗量(cm); t 为入渗历时(min); S 为土壤吸渗率($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$); A 为稳渗率(cm/min)。用式(1)对入渗数据进行拟合,可得各测点的入渗参数值(表 1)。由于各测点的入渗试验在相同时间内重复进行 2~3 次,可有效地减少稳渗率 A 出现负值的情况。

表 1 各测点入渗参数与标定因子值
Table 1 Infiltration parameters and scaling factors in survey points

测点	$S (\text{cm}/\text{min}^{0.5})$	$A (\text{cm}/\text{min})$	a_S	a_A	测点	$S (\text{cm}/\text{min}^{0.5})$	$A (\text{cm}/\text{min})$	a_S	a_A
1	0.505	0.079	0.620	0.692	23	0.498	0.106	0.604	0.798
2	0.392	0.083	0.374	0.707	24	0.213	0.114	0.110	0.828
3	0.810	0.159	1.596	0.979	25	0.201	0.073	0.098	0.663
4	0.279	0.140	0.189	0.919	26	1.510	0.092	5.551	0.745
5	0.566	0.130	0.780	0.884	27	0.553	0.203	0.744	1.106
6	0.828	0.100	1.668	0.774	28	1.080	0.185	2.839	1.056
7	0.817	0.182	1.623	1.047	29	0.183	0.403	0.082	1.558
8	0.972	0.138	2.300	0.911	30	0.790	0.408	1.519	1.568
9	0.993	0.124	2.398	0.865	31	0.911	0.182	2.020	1.047
10	0.399	0.142	0.387	0.925	32	1.320	0.062	4.241	0.611
11	0.713	0.216	1.238	1.141	33	0.122	0.125	0.036	0.868
12	0.252	0.163	0.154	0.991	34	0.841	0.287	1.721	1.315
13	0.764	0.150	1.421	0.949	35	0.010	0.409	0.001	1.570
14	0.729	0.163	1.295	0.991	36	1.090	0.072	2.892	0.659
15	0.700	0.320	1.193	1.389	37	1.000	0.175	2.434	1.027
16	0.487	0.255	0.577	1.240	38	0.566	0.086	0.780	0.720
17	0.898	0.075	1.962	0.674	39	0.663	0.117	1.070	0.840
18	0.910	0.119	2.015	0.845	40	0.446	0.278	0.483	1.294
19	0.559	0.126	0.761	0.872	41	0.960	0.295	2.245	1.333
20	0.159	0.124	0.062	0.864	42	0.106	0.148	0.027	0.944
21	1.132	0.137	3.120	0.909	43	0.249	0.154	0.151	0.963
22	0.760	0.148	1.406	0.945	44	0.254	0.073	0.158	0.663
$\bar{S} = 0.641$				$\bar{A} = 0.166$					

标定理论是在相似定律的基础上发展起来的,即认为田间各点的土壤彼此相似,且忽略了其他因素的影响。对于 Philip 入渗公式的标定原理可参见文献[1],这里不再赘述。根据标定原理,应用以下公式对 Philip 入渗式进行标定,即

$$\alpha_{Sj} = (S_j / \bar{S})^2 ; \alpha_{Aj} = (A_j / \bar{A})^{1/2} \tag{2}$$

$$I^* = \alpha I ; t^* = \alpha^3 t \tag{3}$$

式中, j 为测点号; S_j 和 A_j 为相应测点的入渗参数值; α_{Sj} 为各测点基于吸渗率 S 计算下的标定因子值, α_{Aj} 为各测点基于稳渗率 A 计算下的标定因子值,各测点标定因子值见表 1; α 为标定因子, I^* 和 t^* 分别为

标定后的累计入渗量和入渗历时; $\bar{S}$ 、 $\bar{A}$ 分别为所有测点入渗参数 S 、 A 的均值,采用下式计算

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j ; \bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n A_j \tag{4}$$

式(2)和(3)便是入渗分析中所用到的标定关系,将其代入式(1),结合标定原理,即可得研究区域内标定后的 Philip 入渗公式

$$I^* = 0.641t^{*0.5} + 0.166t^* \tag{5}$$

2.2 标定因子优选

各测点原始入渗曲线如图 1 所示,由图 1 可见未标定的 $I-t$ 曲线,由于土壤物理特性的空间变异,各

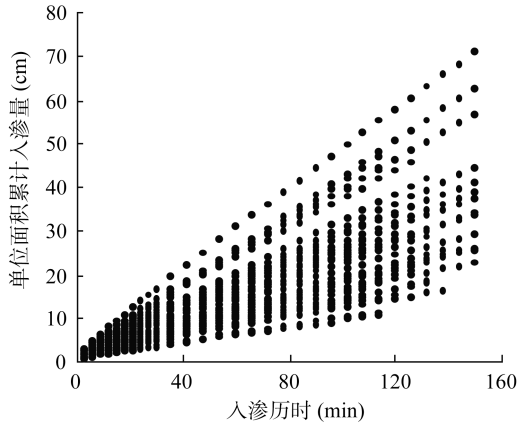


图 1 测点的原始累积入渗曲线
Fig. 1 Original accumulative infiltration curve

测点的入渗量曲线也不尽相同,由此表明标定计算是必要的。

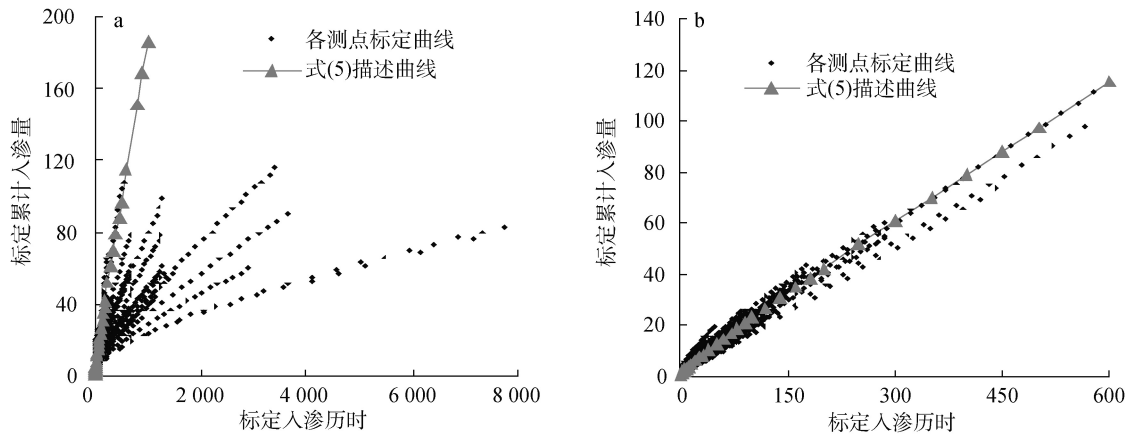
为获得对各测点均适用的 I^*-t^* 关系,定量研究入渗参数的空间变异性,利用基于入渗参数 A 和 S 的标定因子 a_A 和 a_S ,对研究区域内各测点的入渗曲

线进行标定,标定结果见图 2。由图 2 可见, a_S 标定的研究区域内各测点累积入渗曲线与式(5)描述的曲线存在显著差异,标定效果很差。 a_A 标定的各测点累积入渗曲线与式(5)描述的曲线虽不完全吻合,但一致性很高,标定效果较好。

由表 1 和图 2 可知,相同测点的 a_A 与 a_S 值不相等,且 a_A 的标定效果优于 a_S 的标定效果,为求得统一的标定因子便于进一步研究,计算 a_{SA} 、 a_A 和两者的算术平均值 α_{SA}^A 、几何平均值 α_{SA}^G 和调和平均值 α_{SA}^H 以及标定结果的方差 S_S 。

$$\begin{aligned}\alpha_{AS}^A &= \frac{\alpha_A + \alpha_S}{2} & \alpha_{AS}^G &= \sqrt{\alpha_A \alpha_S} \\ \alpha_{AS}^H &= \frac{2\alpha_A \alpha_S}{\alpha_A + \alpha_S} & S_S &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L (I_{ij}^* - \alpha_j I_{ij})^2\end{aligned}\quad (6)$$

式中, N 为各测点入渗过程的时段数, L 为入渗试验的测点数; I_{ij}^* 为式(5)计算的累计入渗量; I_{ij} 为各测点原始的累计入渗量; α_j 为各测点的标定因子。



(a. a_S 标定曲线与式(5)描述曲线比较; b. a_A 标定曲线与式(5)描述曲线比较)

图 2 不同标定的累计入渗量-时间曲线与式(5)描述曲线比较

Fig. 2 Accumulative infiltration-time curve scaled by different scaling factors compared with Eq. (5)

经计算得 a_A 、 a_S 、 α_{SA}^A 、 α_{SA}^G 和 α_{SA}^H 的方差 S_S 分别为 3.2×10^3 、 1.2×10^7 、 3.6×10^5 、 2.8×10^4 和 4.8×10^3 。由此可知,研究区域内 a_A 标定结果的方差 S_S 最小,实际应用中,可选取 a_A 对不同测点的入渗曲线进行标定。基于标定原理,将所选标定因子 a_A 代入式(5),可得研究区域内任意测点累计入渗量与入渗时间的关系式:

$$I = 0.641\alpha_A^{1/2}t^{0.5} + 0.166\alpha_A^2t \quad (7)$$

式(7)中只包含一个未知参数 a_A 。因此,若要对研究区域内的土壤入渗特性进行分析,就需深入研究标定因子 a_A 的空间变异特征。

3 标定因子 a_A 和土壤入渗特性的空间变异特征研究

3.1 标定因子 a_A 的统计特征

对表 1 中由入渗资料计算所得 44 组标定因子 a_A 采用 SPSS 软件进行统计分析,结果见表 2。由表 2 可知标定因子 a_A 的偏斜度和峰度分别为 0.945 和 0.409,表明标定因子 a_A 服从偏态分布,且为正偏;其变异系数为 0.257 5,属于中等变异强度,说明研究区域内的标定因子 a_A 具有较为明显的空间变异性。

表 2 标定因子 a_A 统计特征值
Table 2 Statistical results of scaling factor a_A

测点	分布类型	最大值	最小值	均值	标准差	偏斜度	峰度
44	偏态分布	1.570	0.611	0.970	0.2498	0.945	0.409
	对数正态分布	0.451	-0.493	-0.060	0.2443	0.413	-0.296

由于采用 Kriging 空间插值时要求数据服从正态分布,故需对标定因子 a_A 数据进行转换使其接近于正态分布。应用 SPSS 软件对经过对数转换后的标定因子 a_A 数据进行统计分析(表 2)。经对数转换后,标定因子 a_A 的偏度系数和峰度系数明显较低,其近似服从对数正态分布,适宜采用 Kriging 方法进行空间插值。

3.2 标定因子 a_A 的变异趋势与半方差模型分析

由于受土壤特性等因素的影响,土壤入渗特性的空间分布常呈明显的趋势特征和异向性分布。运用有趋势分析功能的 ArcGIS 软件的地统计学模块,可以方便地获得土壤入渗特性的趋势效应特征。图 3 是研究区域内标定因子 a_A 的空间趋势分析示意图。图中,X 轴表示正东方向,Y 轴表示正北方向,Z 轴表示各样点测定值的大小;正北方向投影面上的曲线表示东西向的全局性趋势效应变化,正东方向投影面上的曲线表示的是南北向全局性的趋势效应变化。图 3 表明,研究区域内标定因子 a_A 在东西向呈现两边向中部逐渐增大的趋势,符合一定的二阶趋势,在南北向上,总体呈现南高北低趋势,同样也近似符合一定的二阶趋势。

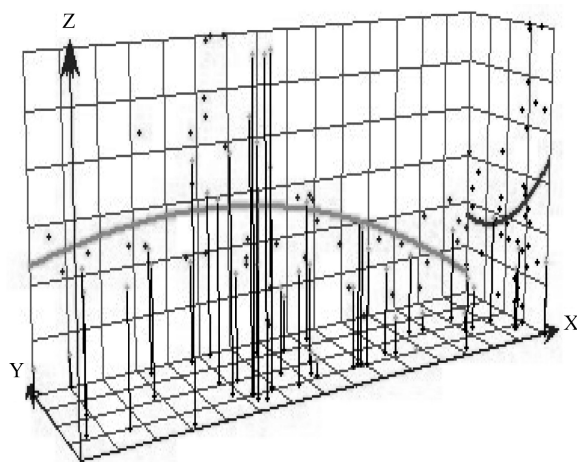


图 3 标定因子 a_A 趋势分析
Fig. 3 Trend analysis of scaling factor a_A

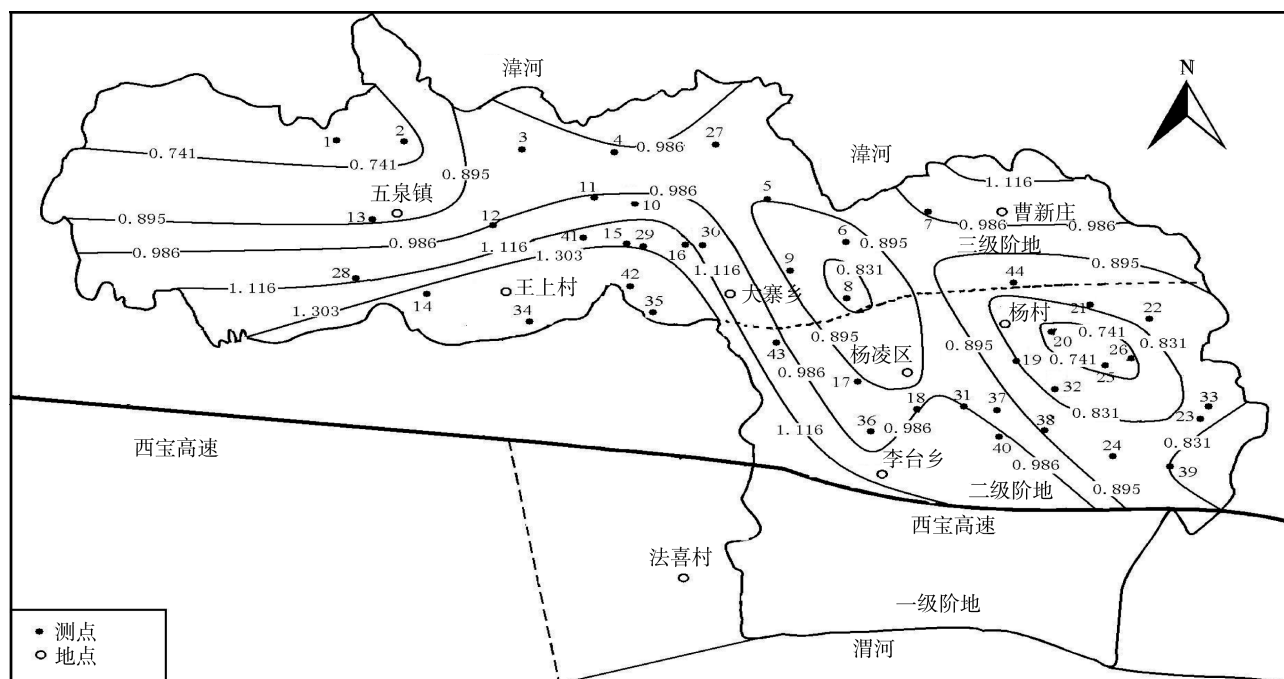
利用 ArcGIS 软件的地统计学模块,选取不同的半方差模型对研究区域内标定因子 a_A 进行拟合,且同时考虑各向异性和二阶趋势效应的影响。模型的选择标准是:平均误差(ME)最接近于 0;标准化平均误

差(MSE)最接近于 0;平均标准误差(ASE)与均方根误差(RMSE)最接近;标准化均方根误差(RMSSE)最接近于 1^[12]。经比较发现标定因子 a_A 空间变异规律最佳拟合模型为球状模型,其平均误差 ME 为 0.011 7、标准化平均误差 MSE 为 0.149 8、平均标准误差 ASE 为 0.169 3、均方根误差 RMSE 为 0.013 8、标准化均方根误差 RMSSE 为 1.002,长轴和短轴变程分别为 2 548.45 m 和 1 611.28 m,表明研究区域内标定因子 a_A 具有明显的各向异性特征,即土壤入渗试验点选取的距离和方向都会对半方差模型产生影响;块金值 C_0 为 0.003 9,基台值 C_0+C_1 为 0.040 2,两者的比值 $C_0/(C_0+C_1)$ 为 0.228 0,其 $C_0/(C_0+C_1)$ 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^[13];由此可知,研究区域内标定因子 a_A 表现出强烈的空间相关性,且空间变异特征主要由结构性因素引起的。

3.3 标定因子 a_A 和土壤累计入渗量的空间变异特征

基于各土壤入渗试验点实测数据计算得出的标定因子 a_A ,在上述研究的基础上,采用普通 Kriging 插值方法,同时考虑标定因子 a_A 的各向异性和选取二阶趋势效应,获得了研究区域内标定因子 a_A 的空间分布图(图 4)。

由图 4 可见标定因子 a_A 的空间变异特征具有一定的规律性,研究区域内西北方向 a_A 值较小,而最大值出现在大寨乡附近,总体呈现出由两边向中部南偏西方向逐渐增大的趋势,这也印证了图 3 对标定因子 a_A 空间变异趋势分析的可靠性。综合考虑杨凌区的地形和土壤质地等因素,其原因可能为杨凌区由南向北,土壤质地由砂壤土逐渐变为黏壤土,而土壤中的黏粒含量对土壤的入渗特性有着较大的影响,在大寨乡附近的土壤黏粒含量较二级阶地和三级阶地内其他地方偏小,故标定因子 a_A 的最大值出现在大寨乡附近。根据插值结果可得研究区域内所有测点标定因子 a_A 的预测值,将其值代入式(7)分别计算各测点在 30 min、60 min 和 90 min 的累计入渗量,并结合普通 Kriging 插值方法产生不同入渗时间累计入渗量

图 4 杨陵区标定因子 a_A 空间分布图Fig. 4 Spatial distribution of scaling factor a_A in Yangling district

的空间分布图(图 5), 由于篇幅有限, 仅列举 90 min 的累计入渗量空间分布图。

由图 5 可见研究区域内 90 min 的累计入渗量空间分布图与标定因子 a_A 的空间分布图具有较高的一致性, 呈现出相似的变异规律, 即研究区域内 90 min 的累计入渗量在西北方向值较小, 而最大值出现在大

寨乡附近, 总体呈现出由两边向中部南偏西方向逐渐增大的趋势, 这也印证了图 4 对标定因子 a_A 空间变异规律预测的可靠性。为进一步验证本文方法对研究区域内标定因子 a_A 和不同入渗时间累计入渗量空间变异规律预测的可靠性, 对所有测点标定因子 a_A 的预测值 a_{AP} 和实测值 a_{AM} , 以及 30 min、60 min、90 min

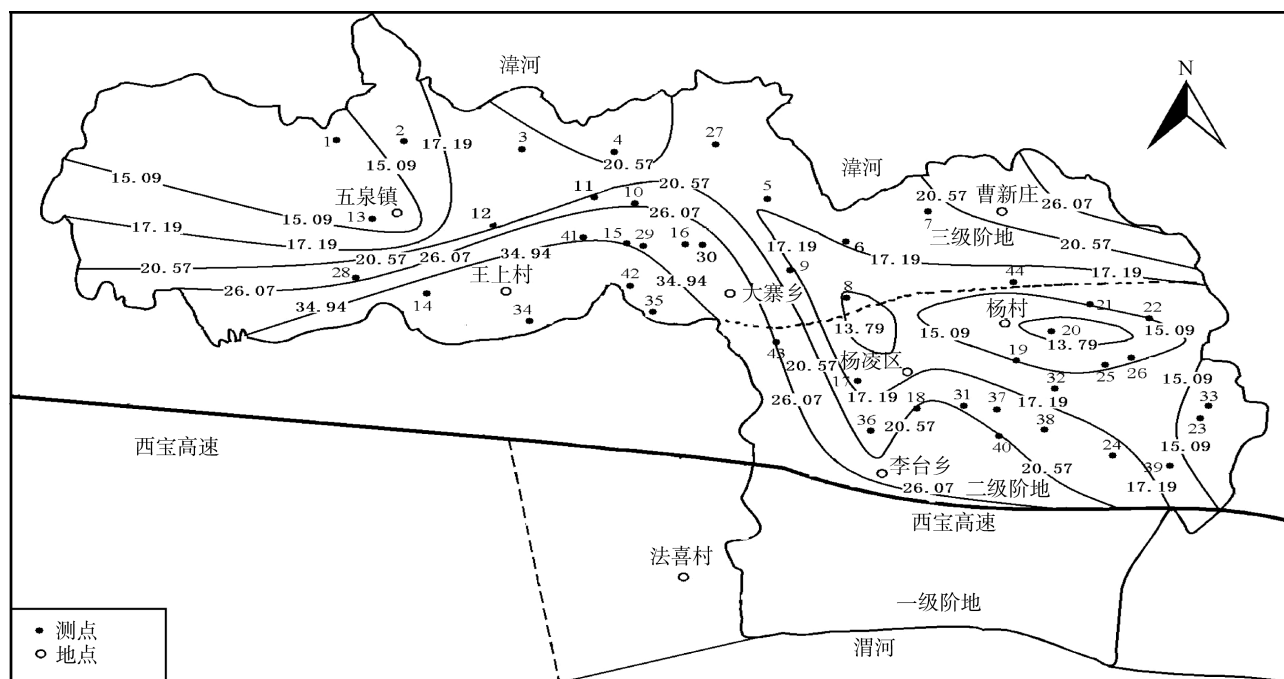


图 5 杨陵区 90 min 预测土壤累计入渗量空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of 90 min predicted cumulative infiltration in Yangling district

表 3 标定因子 a_A 和不同时刻累计入渗量预测值与实测值比较
Table 3 Predicted scaling factor a_A and cumulative infiltration of different times compared with measured values

数据系列		最小值	最大值	均值	平均误差 ME	相对误差(%)	相对误差绝对值均值(%)
a_A	a_{AM}	0.611	1.570	0.970	0.012	1.24	12.25
	a_{AP}	0.670	1.665	0.982			
$I_{30\text{min}}$	I_M	3.285	16.567	8.498	0.006	0.07	28.15
	I_P	5.109	18.336	8.504			
$I_{60\text{min}}$	I_M	5.927	30.599	14.942	0.048	0.32	25.56
	I_P	8.535	34.018	14.990			
$I_{90\text{min}}$	I_M	8.463	44.215	21.047	0.098	0.46	24.57
	I_P	11.684	49.264	21.145			

注：表中误差为 44 个测点预测值与实测值比较的均值。

累计入渗量的预测值 I_P 和实测值 I_M 进行了统计分析，并计算了所有测点预测值和实测值平均误差 ME、相对误差和相对误差绝对值均值，结果见表 3。

由分析可知，研究区域内所有测点标定因子 a_A 和 30 min、60 min、90 min 累计入渗量的预测值和实测值均值在理论上应该相等，即平均误差 ME 为 0。由表 3 可知，所有测点标定因子 a_A 和 30 min、60 min、90 min 累计入渗量的预测值和实测值均值均不相同，存在小的差异，但其相对误差均在 2% 以内，其原因可能是由于标定因子 a_A 的概率分布近似认为服从对数正态分布引起的；对所有测点的相对误差绝对值进行分析，标定因子 a_A 和 30 min、60 min、90 min 累计入渗量预测值和实测值的相对误差绝对值均值分别为 12.25%、28.15%、25.56% 和 24.57%，其中标定因子 a_A 的误差绝对值小于 20% 占有所有测点的 81.82%，30 min、60 min 和 90 min 累计入渗量的误差绝对值小于 30% 占有所有测点的比例分别为 68.18%、70.45% 和 70.45%，其余测点误差相对较大，其原因有以下几个方面：标定理论是在相似定律的基础上发展起来的，认为田间各点的土壤特性彼此相似，且忽略了其他因素的影响；而实际情况下，田间各点土壤特性彼此并不完全相似，且引起土壤入渗特性空间变异特征的因素众多，故导致了标定因子和不同时刻累计入渗量预测值与实测值之间存在一定的误差；采用普通 Kriging 插值时，任意点标定因子的预测值是根据分布在该点周围的其他测点值进行估算，当分布在该点周围其他测点值较大时，则该测点预测值较大，反之则较小；而实际情况下，各测点的土壤入渗特性受到土壤含水量、体积质量和土壤颗粒组成等因素影响，通过分析试验数据发现，各测点的土壤特性参数并非平稳过渡，而在部分测点会有一定的突变，这也导致了部分测点标定因子和不同时刻

累计入渗量预测值与实测值比较误差相对较大；由于误差具有传播性，各测点的累计入渗量是根据标定因子插值结果计算得出，由于部分测点标定因子预测值误差相对较大，这也间接导致了该测点累计入渗量预测值与实测值比较误差相对较大。但总体上来说，本文方法预测的研究区域内标定因子 a_A 和不同入渗时间累计入渗量预测值与实测值相比，误差相对较小，结合实际情况，可认为预测结果是完全可以接受的。

4 结论

- (1) 以标定理论为基础，对 Philip 公式进行了标定计算，比较了不同取值方法下标定因子对土壤累计入渗量的标定结果，结果表明研究区域内以标定因子 a_A 的标定效果最优，并提出了杨凌区黏壤土区域土壤累计入渗量的标定计算公式。
- (2) 研究区域内标定因子 a_A 近似服从对数正态分布，适宜进行 Kriging 空间插值；在半方差结构分析和球状模型套合的基础上，并考虑标定因子 a_A 的二阶趋势效应，分析了研究区域内标定因子 a_A 的地理统计学特征，结果表明研究区域内标定因子 a_A 具有明显的各向异性特征，且表现出强烈的空间相关性，同时说明其空间变异特征主要是由结构性因素引起的。
- (3) 采用普通 Kriging 插值方法，对研究区域内标定因子 a_A 和不同时刻土壤累计入渗量的空间变异特征进行了分析，结果表明两者的空间分布图具有较高的一致性，其西北方向值较小，而最大值出现在大寨乡附近，总体呈现出由两边向中部南偏西方向逐渐增大的趋势，原因可能为杨凌区由南向北，土壤质地由砂壤土逐渐变为黏壤土，而土壤中的黏粒含量对土壤入渗特性有着较大的影响，在大寨乡附近的土壤黏

粒含量较二级阶地和三级阶地内其他地方偏小,故最大值出现在大寨乡附近。

由于文中所选研究区域内的土壤类型相对单一,以及标定理论和方法的局限性,对于多种土壤质地同时存在的区域,如何更好地揭示其土壤入渗特性的空间变异特征还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 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(12): 1-10
- [2] Clausnitzer V, Hopmans JW, Nielsen DR. Simultaneous scaling of soil water retention and hydraulic conductivity curves[J]. Water Resources Research, 1992, 28(1): 19-31
- [3] 李小昱, 雷延武, 王为. 农田土壤特性的空间变异性及 Kriging 估值法[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(6): 30-35
- [4] 雷志栋, 杨诗秀. 田间土壤水分入渗的空间分布[J]. 水利学报, 1987(3): 1-9
- [5] 秦耀东, Anlauf R, Richter J. Philip 入渗公式标定计算的改进[J]. 水利学报, 1989(9): 1-8
- [6] Rasoulzadch A, Sepaskhah AR. Scale infiltration equation for furrow irrigation[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3): 375-383
- [7] Machiwal D, Madan KJ, Mal BC. Modeling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(4): 568-582
- [8] 徐海芳, 刘恩民, 郑丽萍. 农田土壤入渗参数的空间统计特征[J]. 中国农村水利水电, 2004(11): 11-13
- [9] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓, 佟玲, 姚立民. 石羊河流域平原区土壤入渗特性空间变异的研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 471-476
- [10] 屈金娜. 区域尺度土壤入渗特征参数的变异性研究(硕士学位论文)[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008
- [11] 缴锡云, 王维汉, 王颖聪, 谢菊. 入渗参数空间变异规律及其对畦田灌水质量的影响[J/OL]. Http://www.paper.edu.cn. [2009-12-28]
- [12] Johnston K, Ver Hoef JM, Krivoruchko K, Lucas N. Using ArcGIS Geostatistical Analyst[M]. California of USA: Esri Press, 2001
- [13] Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1 501-1 511

Study on Spatial Variability of Infiltration Characteristics in Yangling District

NIE Wei-bo^{1,2}, FEI Liang-jun¹, MA Xiao-yi²

(1 Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2 Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on 44 groups of soil infiltration experiments in Yangling district, this paper analyzed the scaling process of Philip equation and disclosed the spatial variability of infiltration characteristics in Yangling district by using scaled theory, traditional statistical and geostatistics method. The results showed that the scaling of infiltration process based on a_A was best among different scaling factors. The variable coefficient C_v of scaling factor a_A was 0.257 5 which was medium variability, and a_A was showed to be logarithmic normal distribution. Scaling factor a_A was a second-order trend, and the best theoretical model of spatial variability of a_A was spherical model, the proportion between nugget and sill was 0.228 0, showing a_A had anisotropy and strong spatial correlation, and structural factors mainly caused the spatial variability of scaling factor a_A . The results of ordinary Kriging interpolation showed that a_A and the spatial distribution characteristics of accumulative infiltration in 90 min highly agreed with each other. The predicted values of a_A of the 44 groups and accumulative infiltration in 30 min, 60 min, 90 min are compared with the measured values, and the mean absolute errors were 12.25%, 28.15%, 25.56% and 24.57%, respectively. Taking the actual situation into consideration, the predicted values in method of this paper is totally acceptable.

Key words: Soil infiltration characteristics, Philip equation, Scaling, Scaling factor, Spatial variability