

区域尺度土壤入渗参数空间变异性规律研究*

聂卫波¹ 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】 以在杨陵区进行的土壤入渗试验为基础, 利用标定理论、统计学与地统计学相结合的方法研究了 Philip 入渗公式的标定过程, 以及标定因子的空间变异规律。研究表明: 在研究区域内不同标定因子中 α_A 标定的效果最优, 可用 α_A 对入渗曲线进行标定; 利用统计学原理计算了不同置信水平和精度要求下入渗测点的合理取样数; 采用 ArcGIS 软件对标定因子 α_A 的空间变异规律进行了分析; 建立了可根据易测定的土壤物理参数直接估算 α_A 的土壤转换函数, 并通过验证, 其结果可较好地解决区域尺度内土壤入渗参数的点面转换问题。

关键词: 土壤入渗参数 区域尺度 标定 空间变异 合理取样数 土壤转换函数

中图分类号: S152.7+2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0102-07

Spatial Variability of Infiltration Parameters at the Region Scales

Nie Weibo¹ Fei Liangjun¹ Ma Xiaoyi²

(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, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

Based on the infiltration experiments in Yangling district, the objective was to analyze the scaling process of Philip model. The spatial variation discipline of scaling factors was found out and the pedo-transfer function was established for estimating scaling factors. The study showed that the scaling of infiltration process based on α_A was the best among different scaling factors in Yangling district. Therefore, the infiltration curves in the regional scale can be scaled with α_A . Meanwhile, the reasonable sampling number was calculated under the different confidence levers and required precision. The spatial variation discipline of α_A by ArcGIS software was analyzed, and the pedo-transfer function was established to estimate α_A . Accuracy of the estimate α_A was analyzed in terms of pedo-transfer function, the results suggested that it has feasible and reliable for estimating α_A , which could be used to achieve the conversion of soil infiltration between point and region.

Key words Soil infiltration parameters, Region scales, Scaling, Spatial variation, Reasonable sampling number, Soil of pedo-transfer function

引言

土壤入渗参数是区域尺度参数估值的重要基础, 但大量研究表明土壤特性具有明显的空间变异性^[1-4], 需多点测量才能取得足够的精度。为此, 众多学者利用标定理论和方法来研究土壤特性的变异

规律^[5-14], 但都集中在田间尺度上, 没有涉及到区域尺度, 由于区域尺度上的土壤入渗特性空间变异性更大, 这就造成了该问题研究的复杂性。贾宏伟^[15]在石羊河流域野外入渗试验的基础上, 建立了简化 Philip 入渗公式及其土壤转换函数, 并分析了入渗特性的空间变异特征; 屈金娜^[16]通过田间入渗

收稿日期: 2010-09-09 修回日期: 2010-10-27

* 国家自然科学基金资助项目(51079121)、陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ7010)、中国博士后科学基金资助项目、西安理工大学博士科研启动基金资助项目和陕西省重点学科建设资助项目

作者简介: 聂卫波, 讲师, 博士, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: nwbo2000@163.com

试验,研究了杨凌区土壤入渗参数的空间变异规律。虽然这些研究取得了一定成果,但由于区域尺度上土壤入渗参数空间变异规律的复杂性,仍需对其深入研究,以期更好地解决该问题。因此,本文选取杨凌区粘壤土区域为研究对象,通过田间双环入渗试验,运用标定理论、统计学与地统计学相结合的方法对 Philip 入渗公式进行标定,并对标定因子的合理取样数和空间变异规律进行分析,并试图建立估算研究区域内标定因子的土壤转换函数,以期较好解决区域尺度内土壤入渗参数的点面转换问题。

1 试验

杨凌区属于大陆季风性气候,地处典型的半干旱气候区,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。根据杨凌区土壤质地的分布情况,于 2007 年 4~5 月份在二、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)进行土壤入渗参数的空间变异规律试验,试验区土壤质地为粘壤土,主要种植作物为小麦和春玉米,共选取 44 个较典型的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积入渗量,直到入渗稳定为止,各测点重复 2~3 次,入渗参数取平均值;在各测点采集土样,测定其初始含水率、容积密度以及分析土壤颗粒组成(根据中国土壤质地分类标准)等;利用 GPS 定位仪测定各测点经、纬度值。

2 Philip 公式的标定

2.1 基于标定理论建立 Philip 公式

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 Kostikov 公式、Horton 公式、Holtan 公式和 Smith 公式等;半理论半经验性的有 Green-Ampt 公式和 Philip 公式等。大量研究表明 Philip 公式形式简单,所含参数少,能够很好描述均质土壤短历时条件下一维入渗过程^[1,6,10],其公式为

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

式中 I ——单位面积上的累积入渗量, cm

t ——入渗历时, min

S ——土壤吸渗率, cm/min^{0.5}

A ——稳渗率, cm/min

用式(1)对入渗数据进行拟合,可求得各测点的入渗参数值,如表 1 所示。由于各测点的入渗试验在相同时间内重复进行 2~3 次,从而可有效地减少稳渗率 A 出现负值的情况。

对于 Philip 入渗公式标定原理可参见文献[1]。根据标定原理,对 Philip 入渗式进行标定,即

$$\alpha_{Sj} = (S_j/\bar{S})^2 \quad (2)$$

$$\alpha_{Aj} = (A_j/\bar{A})^{1/2} \quad (3)$$

$$I^* = \alpha I \quad (4)$$

$$t^* = \alpha^3 t \quad (5)$$

其中
$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j \quad (6)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n A_j \quad (7)$$

式中 j ——测点序号

S_j, A_j ——相应测点的入渗参数值

α_{Sj} ——各测点基于吸渗率 S 计算下的标定因子值

α_{Aj} ——各测点基于稳渗率 A 计算下的标定因子值

α ——选用的标定因子值

I^*, t^* ——标定后的累积入渗量和入渗历时

\bar{S}, \bar{A} ——所有测点入渗参数 S, A 的均值

式(2)~(5)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

$$I^* = 0.641t^{*0.5} + 0.166t^* \quad (8)$$

2.2 Philip 公式标定因子优选

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,由于土壤特性的空间变异,各测点的入渗量曲线也不尽相同,但总体呈现一定规律,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 α_A 和 α_S ,对区域尺度上各测点的入渗曲线进行标定,标定结果如图 2 所示。由图 2 可知,标定后各测点入渗曲线的离散程度比标定前(图 1)明显降低; α_S 标定的区域尺度上各测点的累积入渗曲线,与式(8)描述的曲线存在显著差异,标定效果很差; α_A 标定的区域尺度上各测点的累积入渗曲线,与式(8)描述的曲线虽不完全吻合,但一致性很高,标定效果较好,这与文献[10]和[16]的研究结果类似。进一步分析区域内标定因子关系,如图 3 所示,标定因子的预测趋势总是向着 α_S 方向延伸,因土壤初始含水率对吸渗率 S 的影响比对稳渗率 A 大得多^[17],故全部测点的土壤吸渗率 S 变化范围明显大于稳渗率 A ,这也进一步说明了用 α_A 标定的累积入渗量关系曲线优于用 α_S 标定的曲线。

由上面分析可知,相同测点的 α_A 与 α_S 值不相等,且 α_A 的标定效果优于 α_S 的标定效果,为求得统

表1 各测点入渗参数与标定因子值

Tab.1 Results of infiltration parameters and scaled parameters for every survey point

测点 序号	经度	纬度	土壤吸渗率 $S/\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$	稳渗率 $A/\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	标定因子		初始含水 率 $\theta_0/\%$	容积密度 $r_d/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	粘粒含 量 S_c	砂粒含 量 S_a
					α_s	α_A				
1	107° 56' 57"	34° 18' 58"	0.505	0.079	0.620	0.692	19.57	1.42	0.274	0.055
2	107° 57' 38"	34° 18' 59"	0.392	0.083	0.374	0.707	15.74	1.62	0.268	0.056
3	107° 59' 08"	34° 18' 50"	0.810	0.159	1.596	0.979	17.81	1.50	0.264	0.058
4	107° 59' 58"	34° 18' 50"	0.279	0.140	0.189	0.919	19.27	1.40	0.254	0.060
5	108° 01' 15"	34° 18' 36"	0.566	0.130	0.780	0.884	17.31	1.51	0.261	0.059
6	108° 01' 48"	34° 18' 32"	0.828	0.100	1.668	0.774	19.55	1.37	0.263	0.058
7	108° 02' 25"	34° 18' 40"	0.817	0.182	1.623	1.047	17.60	1.42	0.261	0.059
8	108° 01' 56"	34° 17' 53"	0.972	0.138	2.300	0.911	18.92	1.34	0.266	0.056
9	108° 01' 15"	34° 17' 48"	0.993	0.124	2.398	0.865	20.74	1.35	0.261	0.057
10	108° 00' 23"	34° 17' 54"	0.399	0.142	0.387	0.925	22.42	1.30	0.231	0.080
11	108° 00' 06"	34° 18' 01"	0.713	0.216	1.238	1.141	18.55	1.56	0.202	0.099
12	107° 58' 48"	34° 18' 03"	0.252	0.163	0.154	0.991	20.47	1.24	0.230	0.079
13	107° 57' 33"	34° 18' 04"	0.764	0.150	1.421	0.949	18.96	1.35	0.211	0.080
14	107° 58' 01"	34° 17' 19"	0.729	0.163	1.295	0.991	18.21	1.34	0.229	0.076
15	108° 00' 24"	34° 17' 26"	0.700	0.320	1.193	1.389	16.19	1.39	0.190	0.099
16	108° 00' 49"	34° 17' 26"	0.487	0.255	0.577	1.240	17.26	1.50	0.205	0.090
17	108° 01' 44"	34° 17' 33"	0.898	0.075	1.962	0.674	16.22	1.35	0.280	0.048
18	108° 02' 36"	34° 17' 27"	0.910	0.119	2.015	0.845	18.96	1.54	0.268	0.061
19	108° 03' 26"	34° 17' 34"	0.559	0.126	0.761	0.872	16.99	1.44	0.270	0.060
20	108° 04' 45"	34° 18' 04"	0.159	0.124	0.062	0.864	20.12	1.20	0.294	0.077
21	108° 05' 35"	34° 18' 08"	1.132	0.137	3.120	0.909	15.99	1.38	0.243	0.070
22	108° 06' 15"	34° 17' 45"	0.760	0.148	1.406	0.945	18.10	1.32	0.235	0.077
23	108° 06' 29"	34° 17' 20"	0.498	0.106	0.604	0.798	18.17	1.47	0.245	0.050
24	108° 04' 59"	34° 17' 05"	0.213	0.114	0.110	0.828	18.36	1.42	0.229	0.043
25	108° 05' 28"	34° 17' 38"	0.201	0.073	0.098	0.663	20.27	1.34	0.258	0.069
26	108° 05' 00"	34° 17' 38"	1.510	0.092	5.551	0.745	18.39	1.33	0.249	0.068
27	108° 00' 25"	34° 18' 57"	0.553	0.203	0.744	1.106	18.88	1.28	0.229	0.071
28	107° 57' 18"	34° 17' 27"	1.080	0.185	2.839	1.056	16.34	1.29	0.211	0.060
29	108° 00' 26"	34° 17' 25"	0.183	0.403	0.082	1.558	16.27	1.26	0.201	0.095
30	108° 00' 48"	34° 17' 25"	0.790	0.408	1.519	1.568	19.40	1.47	0.214	0.104
31	108° 02' 42"	34° 17' 26"	0.911	0.182	2.020	1.047	17.79	1.31	0.224	0.085
32	108° 04' 03"	34° 17' 25"	1.320	0.062	4.241	0.611	16.38	1.40	0.269	0.048
33	108° 06' 30"	34° 17' 19"	0.122	0.125	0.036	0.868	18.98	1.43	0.244	0.053
34	107° 59' 03"	34° 17' 00"	0.841	0.287	1.721	1.315	17.18	1.52	0.189	0.083
35	108° 00' 31"	34° 17' 08"	0.010	0.409	0.000	1.570	19.42	1.27	0.216	0.086
36	108° 01' 46"	34° 17' 26"	1.090	0.072	2.892	0.659	21.36	1.46	0.265	0.043
37	108° 02' 46"	34° 17' 26"	1.000	0.175	2.434	1.027	17.50	1.33	0.230	0.077
38	108° 03' 39"	34° 17' 32"	0.566	0.086	0.780	0.720	19.22	1.35	0.260	0.060
39	108° 06' 45"	34° 16' 50"	0.663	0.117	1.070	0.840	16.39	1.34	0.245	0.051
40	108° 00' 05"	34° 17' 10"	0.446	0.278	0.483	1.294	11.24	1.30	0.224	0.069
41	108° 00' 24"	34° 17' 14"	0.960	0.295	2.245	1.333	15.50	1.31	0.214	0.079
42	108° 02' 52"	34° 17' 24"	0.106	0.148	0.027	0.944	14.77	1.22	0.185	0.070
43	108° 01' 17"	34° 17' 17"	0.249	0.154	0.151	0.963	13.77	1.21	0.227	0.074
44	108° 04' 24"	34° 18' 07"	0.254	0.073	0.158	0.663	12.26	1.24	0.236	0.069
均值			$\bar{S}=0.641$		$\bar{\alpha}=0.166$					

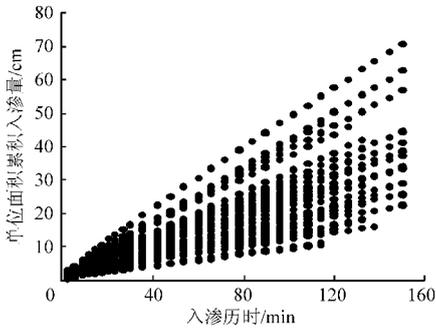


图1 测点的原始累积入渗量曲线

Fig. 1 Original accumulative infiltration curves

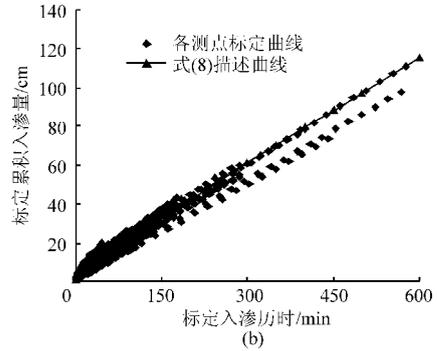
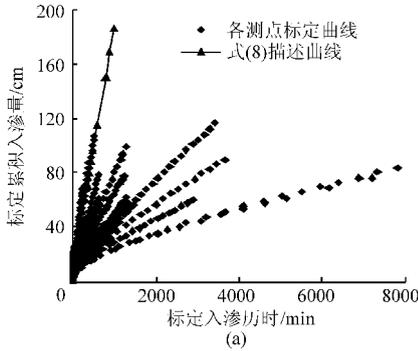


图2 标定的累积入渗量-时间曲线

Fig. 2 Accumulative infiltration-time curves scaled

(a) α_S (b) α_A

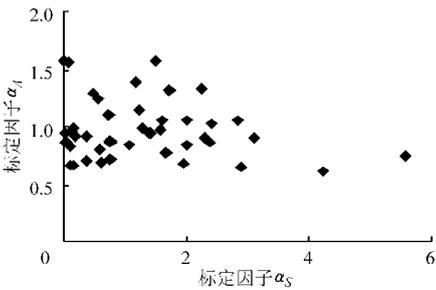


图3 区域内标定因子的关系

Fig. 3 Relationship of scaling factors

式中 N ——各测点入渗过程的时段数
 M ——入渗试验的测点数
 I_{ij}^* ——式(8)计算的累积入渗量
 I_{ij} ——各测点原始的累积入渗量
 α_j ——各测点选用的标定因子

经计算得 α_A 、 α_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,区域尺度上 α_A 标定结果的方差 S_S 最小,实际应用中,可选取 α_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 α_A 代入式(8),可得研究区域内任意测点累积入渗量与入渗时间的关系式,即

$$I = 0.641\alpha_A^{1/2}t^{0.5} + 0.166\alpha_A^2t \quad (13)$$

式中只包含一个未知参数 α_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

一的标定因子,便于进一步研究,比较分析了 α_S 、 α_A 及其两者的算术平均值 α_{SA}^A 、几何平均值 α_{SA}^G 和调和平均值 α_{SA}^H 标定结果的方差 S_S

$$\alpha_{AS}^A = \frac{\alpha_A + \alpha_S}{2} \quad (9)$$

$$\alpha_{AS}^G = \sqrt{\alpha_A \alpha_S} \quad (10)$$

$$\alpha_{AS}^H = \frac{2\alpha_A \alpha_S}{\alpha_A + \alpha_S} \quad (11)$$

$$S_S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I_{ij}^* - \alpha_j I_{ij})^2 \quad (12)$$

因子 α_A 的空间变异规律。

3 区域尺度标定因子 α_A 的空间变异规律

3.1 合理取样数的确定

由于土壤空间变异性的特点,取样点的数目不宜过少,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取样数的问题。合理的取样数 N 应满足要求:样本的均值 \bar{x}_N 和总体的均值 u 之差的绝对值小于或等于某一规定精度 Δ 的这一事件的概率达到所要求的置信水平 P_l ,即合理的取样数目应满足

$$P\{|\bar{x}_N - u| \leq \Delta\} = P_l \quad (14)$$

若取样是独立的,且数目足够多,则中心极限定理成立。因此,可知随机变量 $\eta = (\bar{x}_N - u) / \sqrt{\sigma^2/N}$ 为标准正态分布。在实际应用中,总体方差 σ^2 是未知的,可由样本方差 s^2 代替,由此可得

$$P\left\{\left|\frac{\bar{x}_N - u}{\sqrt{s^2/N}}\right| \leq \lambda_{a,f}\right\} = P_l \quad (15)$$

式中 $\lambda_{a,f}$ —— t 分布特征值,由显著水平 $a = 1 - P_l$ 和自由度 $f = N - 1$ 查 t 分布表求得
 由式(14)和(15)可求得合理取样数

$$N = \lambda_{a,f}^2 \left(\frac{s}{\Delta}\right)^2 \quad (16)$$

若考虑到取样精度 $\Delta = ku$ (k 为精度要求)要

求,则式(16)可改写为

$$N = \lambda_{af}^2 \left(\frac{s}{ku} \right)^2 = \lambda_{af}^2 \left(\frac{C_V}{k} \right)^2 \quad (17)$$

式中 C_V ——变异系数

对表1中由入渗资料计算所得44组标定因子 α_A 进行统计分析,其最大值为1.570,最小值为0.611,均值为0.970,可知标定因子 α_A 的变异系数为0.2575,属于中等变异强度,其偏度系数和峰度系数分别为0.945和0.409,这说明频率分布曲线

表现为正偏,存在一定的高峰态。

在置信水平 P_l 为95%、90%、80%,精度误差 k 为5%和10%的条件下,采用式(17)结合统计分析数据,计算区域尺度内土壤入渗测点的合理取样数,结果如表2所示。由表2可知,在不同置信水平和精度要求下的合理取样数相差较大,同时也表明文中试验测点数能够满足10%的精度误差下95%的置信水平要求,或者说可满足5%的精度误差下80%的置信水平要求。

表2 合理取样数计算结果

Tab.2 Statistic results of reasonable sampling number

参数	$P_l = 95\%$		$P_l = 90\%$		$P_l = 80\%$	
	$k = 5\%$	$k = 10\%$	$k = 5\%$	$k = 10\%$	$k = 5\%$	$k = 10\%$
合理取样数 N	102	26	72	18	44	11

3.2 标定因子 α_A 的变异趋势

为准确描述标定因子 α_A 在研究区域分布特征,采用 ArcGIS 软件对其空间变异规律进行研究。首先利用 GIS 投影功能选择高斯投影模式,将各测点经、纬度值转换为平面坐标值,再将转换的坐标值导

入 ArcGIS 软件生成各测点在图中的位置,结合表1实测资料计算得出各测点标定因子 α_A 值,由于标定因子 α_A 值呈偏态分布,对其进行对数转换后,其数据呈正态分布,再利用 ArcGIS 软件的地理统计分析功能得出研究区域内 α_A 的等值线图(图4)。

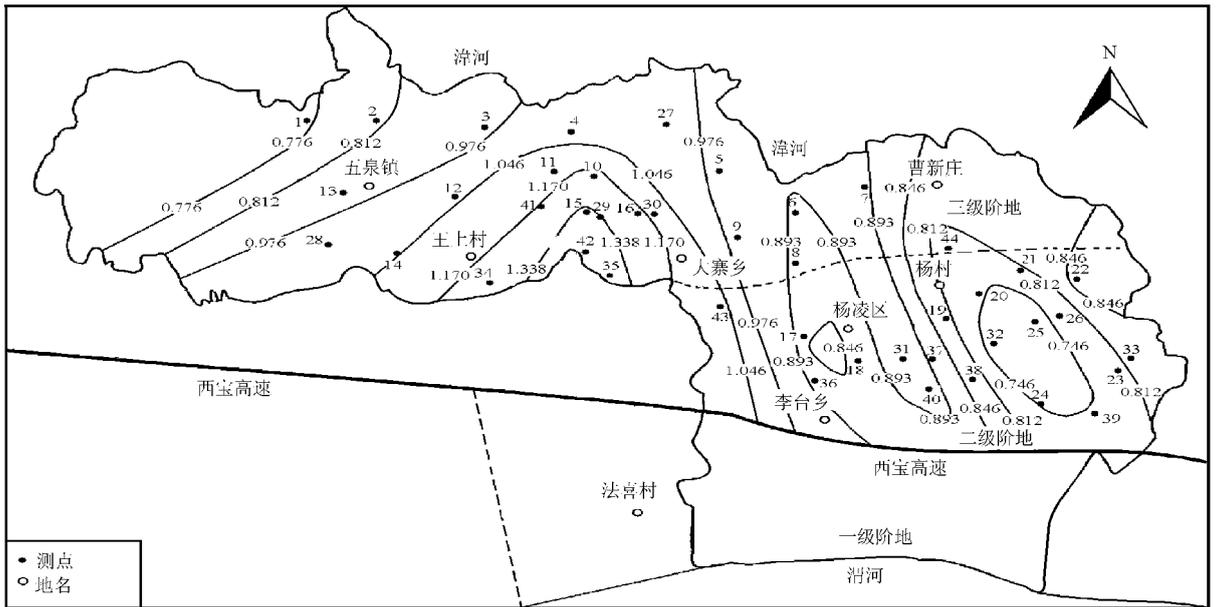


图4 区域尺度内标定因子 α_A 等值线图

Fig.4 Contour map of scaled coefficient α_A in large scale

由图4可见,标定因子 α_A 的空间变异性比较稳定,具有一定的规律性,研究区域内西北方向 α_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。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,其土壤质地由砂壤土逐渐变为粘壤土,且土壤中的粘粒含量对土壤的入渗特性有着较大的影响,而大寨乡附近的土壤粘粒含量较二级阶地和

三级阶地内其他地方要小,故标定因子 α_A 的最大值出现在大寨乡附近。

为验证 ArcGIS 软件预测区域标定因子 α_A 值变异规律的可靠性,利用 ArcGIS 软件分析功能生成研究区域内所有测点标定因子 α_A 空间变异规律预测值与实测计算值的比较,如图5所示。由图5可见,除个别点误差较大,其余点均分布在1:1线附近,表明在双环入渗试验推求最优标定因子的基础上,采

用 ArcGIS 软件分析得出研究区域内标定因子 α_A 的空间变异规律是可靠的。

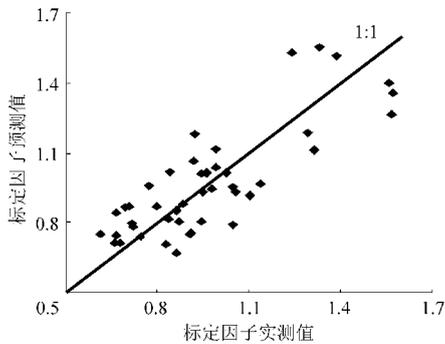


图5 标定因子实测计算值与预测值比较

Fig. 5 Comparison between calculated and predicted scaled coefficients

3.3 土壤转换函数

根据上文分析可知,基于标定理论建立的入渗模型只包含一个未知参数 α_A ,根据 α_A 的空间变化规律便可实现土壤入渗的点面转换。因此,如何快速准确地确定标定因子 α_A 便成为亟需解决的问题。区域尺度上,通过大规模测试获取水力参数显然是十分困难的,也是没有必要的,一些粗略的估算公式便可满足土壤水分模拟计算的需要^[18]。由于土壤水力参数本质上是土壤质地决定的,因而可通过构建水力参数与易测定的土壤物理参数的函数关系即土壤转换函数,估算区域尺度上的水力参数。以土壤基本物理特性为自变量,参数 α_A 为因变量,利用多项式逐步回归分析法,将部分对标定因子 α_A 影响较小的变量剔除,建立估算标定因子 α_A 的土壤转换函数为

$$\alpha_A = 90.697S_a^2 - 4.274S_c^2 - 21.863S_aS_c - 1.202\theta_0 + 0.066r_d + 1.244 \quad (R = 0.7607) \quad (18)$$

式中 r_d ——土壤容积密度, g/cm^3

θ_0 ——初始(质量)含水率, %

为验证式(18)的可靠性,将其估算结果与各测点实测 α_A 值进行比较,结果如图6所示。由图6可知, α_A 的估算值与实测值较为接近,其所有点误差绝对值均值为 11.04%,结合区域尺度内的实际情况,可认为其误差在一个较为合理的范围内,且式(18)中所含参数也易测定,说明式(18)的估算结果比较合理,且同时具有一定的适用性。为进一步验证式(18)的可靠性,将式(18)计算的各测点标定因子代入式(13)中,将各测点累积入渗量的预测值与实测值(原始值)进行比较,结果如图7所示。由

图7可知,两者较为接近,由此表明利用土壤基本物理特性建立的估算研究区域内标定因子 α_A 的土壤转换函数,可较好地解决区域入渗点面转换及入渗参数难以取得的问题。

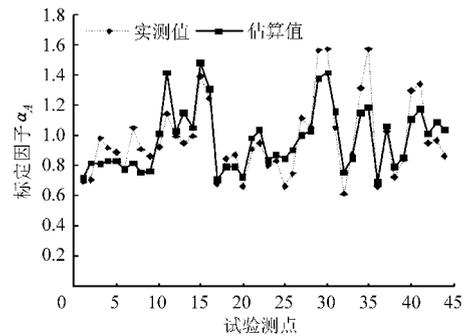


图6 区域尺度上 α_A 的估算值与实测值的比较

Fig. 6 Comparison between estimated and measured α_A at region scale

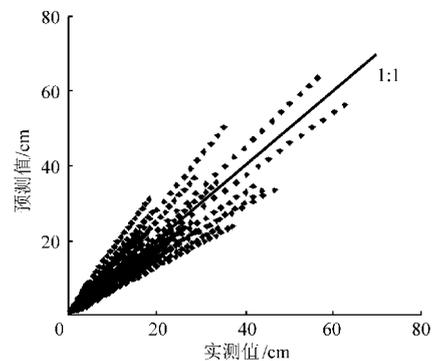


图7 累积入渗量实测值与预测值比较

Fig. 7 Comparison between calculated and predicted cumulative infiltration

4 结论

(1)通过比较不同取值方法下标定因子的标定结果,其在所研究的区域内以标定因子 α_A 的标定效果最优。

(2)以统计原理为基础对入渗资料所得 44 组标定因子 α_A 进行的分析表明,属中等变异强度,计算了不同置信水平和精度要求下入渗测点的合理取样数。

(3)采用 ArcGIS 软件对标定因子 α_A 的空间变异规律进行了研究,并通过验证,结果表明采用 ArcGIS 软件对区域尺度内 α_A 的空间变异规律进行分析是可行的。

(4)建立了可根据易测定的土壤物理参数直接估算 α_A 的土壤转换函数,可较好地解决区域尺度内土壤入渗参数的点面转换问题。

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,1986,17(12):1~10.
Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xie Senchuan. One-step method of scaling the soil hydraulic properties in the filed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986,17(12):1~10. (in Chinese)
- 2 Clausnitzer V, Hopmans J W, Nielsen D R. Simultaneous scaling of soil water retention and hydraulic conductivity curs [J]. Water Resources Research, 1992, 28(1):19~31.
- 3 黄冠华. 土壤水力特性空间变异的实验研究进展[J]. 水科学进展,1999,10(4):450~457.
Huang Guanhua. A review of experimental study on spatial variability of soil hydraulic properties [J]. Advance in Water Science, 1999, 10(4):450~457. (in Chinese)
- 4 李小昱,雷廷武,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.
Li Xiaoyu, Lei Tingwu, Wang Wei. Spatial variability of field soil properties and Kriging method [J]. Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis, 2000, 28(6):30~35. (in Chinese)
- 5 雷志栋,杨诗秀. 田间土壤水分入渗的空间分布[J]. 水利学报,1987,18(3):1~9.
Lei Zhidong, Yang Shixiu. Spatital distribution of infiltration in the filed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 18(3):1~9. (in Chinese)
- 6 秦耀东, Anlauf R, Richter J. Philip 入渗公式标定计算的改进[J]. 水利学报,1989,20(9):1~8.
Qin Yaodong, Anlauf R, Richter J. A new method for scaling Philip's equation of infiltration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989,20(9):1~8. (in Chinese)
- 7 黄冠华,沈荣开. 土壤水力特性空间变异性的随机模拟[J]. 武汉水利电力大学学报,1996,29(3):13~18.
Huang Guanhua, Shen Rongkai. Stochastic modeling of spatial variability of soil hydraulic properties [J]. J. Wuhan Univ. of Hydr. & Elec. Eng., 1996,29(3):13~18. (in Chinese)
- 8 Moustafa M M. A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt [J]. Agric Water Manage, 2000, 42(3):291~312.
- 9 Rasoulzadch A, Sepaskhah A R. Scale infiltration equation for furrow irrigation [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3):375~383.
- 10 Machiwal D, Madan K J, Mal B C. Modeling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India [J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(4):568~582.
- 11 Junior V V, Carvalho M P, Dafonte J, et al. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 85(2):166~177.
- 12 Gallardo A, Paramó R. Spatial variability of soil elements in two plant communities of NW Spain [J]. Geoderma, 2007, 139(2):199~208.
- 13 Brocca L, Morbidelli R, Melone F, et al. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(3):356~373.
- 14 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.
Xu Haifang, Liu Enmin, Zheng Liping. Study on the spatial correlation between topsoil's infiltration indexes of farmland [J]. China Rural Water and Hydropower, 2004(11):11~13. (in Chinese)
- 15 贾宏伟,康绍忠,张富仓,等. 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.
Jia Hongwei, Kang Shaozhong, Zhang Fucang, et al. Spatial variability of soil water infiltration in the plain of Shiyang river basin [J]. Advance in Water Science, 2006, 17(4):471~476. (in Chinese)
- 16 屈金娜. 区域尺度土壤入渗特征参数的变异性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.
Qu Jinna. Research on the spatial variation of soil infiltration characteristic parameter [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2008. (in Chinese)
- 17 曾辰,王全九,樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(1):24~30.
Zeng Chen, Wang Quanjiu, Fan Jun. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration characteristics of soil [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1):24~30. (in Chinese)
- 18 Wosten J H M, Van Genuchten M Th. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(6):1762~1770.