

# 石羊河流域平原区土壤入渗特性空间变异的研究

贾宏伟<sup>1,2</sup>, 康绍忠<sup>1,3</sup>, 张富仓<sup>1</sup>, 佟 玲<sup>1</sup>, 姚立民<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020;  
3. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 在野外原位入渗试验的基础上, 建立了简化 Philip 入渗模型及其土壤转换函数, 借助 ARCVIEW 软件生成了石羊河流域平原区土壤入渗特性参数的空间分布图, 并分析了入渗特性的空间变异特征。研究表明, 简化 Philip 入渗模型是点面转化中比较理想的模型, 模型参数 的土壤转换函数可以简便地估算土壤入渗特性, 两者的结合是研究大尺度土壤入渗空间变异的一种有效方法。

**关 键 词:** 土壤入渗; 简化 Philip 入渗模型; 土壤转换函数; 空间变异; 石羊河流域

**中图分类号:** S152.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2006)04-0471-06

土壤入渗是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节, 与水文转换、土壤侵蚀、农田灌溉和养分迁移等都有密切联系。20 世纪以来对此问题的研究一直比较活跃, Kostakov(1932 年)、Horton(1940 年)、Philip(1957 年)、Smith(1972 年)等众多学者分别建立了土壤入渗模型, 随后数值模拟又得到进一步的发展, 同时也开展了土壤质地、土壤结构、土壤分层以及有机质含量等对入渗速率影响的研究<sup>[1~5]</sup>。近十几年来, 随着对大尺度水文转换的关注, 许多学者对土壤入渗的区域分布规律展开了探讨, 但由于入渗点面转化方法没有解决, 一部分研究集中在对入渗空间特征的定性描述上, 即侧重研究不同地形地貌和土地利用方式条件下的土壤入渗速率的空间变化规律<sup>[6~11]</sup>, 而另一部分研究仅对稳定入渗率的空间变异特征进行了分析<sup>[7,12]</sup>, 都不能完全反映入渗特性的空间特征。

大尺度土壤入渗空间变异的研究主要面临两个困难<sup>[13]</sup>: 土壤入渗的点面转化问题, 地质统计学方法是进行空间变异特性分析的比较成熟的方法<sup>[14,15]</sup>, 但只适合对一个参数的分析, 这就要求在空间变异特征分析时, 用一个参数表示一条入渗曲线。以往入渗模型的研究主要集中在提高模型拟合的精度, 模型参数至少有两个, 在田间尺度的研究中, 目前采用以相似介质(几何相似)为理论基础标定方法<sup>[11]</sup>, 将一条入渗曲线转化为一个标定系数, 但对于较大尺度, 土壤已不属于相似介质, 该方法应用范围受到限制, 而且使用起来也比较麻烦; 土壤入渗特性参数难以取得, 野外原位入渗参数测试费时费力, 尤其在大尺度的范围进行大规模的测试几乎是不可能, 因此有必要寻求确定土壤入渗参数的简便方法。

为解决上述两个问题, 本文建立了甘肃省石羊河流域简化 Philip 入渗模型及其土壤转换函数, 并以此为基础, 对石羊河流域平原区入渗特性的空间变异特征进行了分析讨论。本研究不但对进一步研究大尺度水文转化具有重要的基础理论意义, 而且对研究和解决石羊河流域的水资源利用和脆弱的生态环境问题具有重要的现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部, 腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠之间, 总面积为 4.16 万 km<sup>2</sup>。该流域地

收稿日期: 2005-01-20; 修订日期: 2005-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90202001); 国家自然科学基金重点资助项目 (50339030); 教育部重点科学技术研究资助项目 (重点 02075)

作者简介: 贾宏伟(1971 - ), 男, 陕西蓝田人, 浙江省水利河口研究院工程师, 硕士, 主要从事土壤水分运动及节水灌溉研究。E-mail: jia.hongwei@tom.com

处典型大陆性气候的温带干旱荒漠区,日照强烈、干旱少雨、蒸发潜势大、冷热剧变且多大风,生态环境十分脆弱,是西北干旱区典型的内陆河流域。

## 1.2 试验方法

试验区土壤类型主要为灌漠土、潮土及固定风沙土。根据土壤分布状况,在绿洲及绿洲边缘选择了 28 个有代表性的点进行原位入渗试验,同时开挖土壤剖面,剖面深 1 m,用环刀采原状土土样,以袋装散土土样。

土壤水分入渗过程采用双环法测定,每点重复 2~3 次。入渗内环直径为 25 cm,高 20 cm,埋入土壤 10 cm,用马氏瓶控制地表水层 1~2 cm。

土壤初始含水量随土层深度每隔 10 cm 取一样,测深 70~80 cm,用酒精燃烧法测定。土壤颗粒分析根据我国土壤质地分类标准采用吸管法测定。

土壤有机质含量采用稀释热法测定。

土壤干容重、孔隙度用 100 cm<sup>3</sup> 环刀取原状土在室内测定。

从开挖的土壤剖面看,土壤耕作层厚度一般在 38 cm 左右,土壤质地相对均一,野外入渗试验入渗稳定时,入渗深度一般为 30 cm 左右,不超过耕作层深度,因此各点土壤理化参数及初始含水量均取土壤耕作层的平均值。各土壤理化参数、初始含水量及由实测入渗数据计算的稳定入渗率  $i_c$  见表 1。

表 1 石羊河流域土壤理化参数及入渗拟合参数

Table 1 Soil phy-chemical parameters and calibrated infiltration parameters of Shiyang River basin

序号	干容重	初始含水量 /(g g <sup>-1</sup> )	孔隙度	粘粒	砂粒	粗粉粒	有机质	土壤质地	$K$ /(mm min <sup>-1/2</sup> )	$R$	$i_c$ /(mm min <sup>-1</sup> )
1	1.518	0.100	0.457	0.058	0.448	0.185	0.0033	砂壤土	0.445	0.996	0.050
2	1.607	0.060	0.396	0.097	0.299	0.394	0.0025	砂壤土	0.331	0.974	0.045
3	1.504	0.053	0.503	0.072	0.394	0.374	0.0037	砂壤土	0.169	0.987	0.040
4	1.626	0.129	0.459	0.126	0.252	0.306	0.0031	砂壤土	0.260	0.987	0.020
5	1.623	0.061	0.415	0.057	0.449	0.232	0.0022	砂壤土	0.818	0.910	0.100
6	1.418	0.134	0.405	0.116	0.405	0.278	0.0034	砂壤土	0.120	0.964	0.015
7	1.615	0.031	0.364	0.067	0.715	0.112	0.0011	粗砂土	0.894	0.930	0.190
8	1.513	0.053	0.402	0.087	0.686	0.102	0.0026	细砂土	0.334	0.916	0.030
9	1.481	0.047	0.438	0.091	0.184	0.474	0.0028	粉 土	0.284	0.917	0.030
10	1.512	0.053	0.398	0.087	0.474	0.241	0.0031	砂壤土	0.542	0.968	0.100
11	1.604	0.107	0.456	0.136	0.253	0.376	0.0032	砂壤土	0.220	0.902	0.020
12	1.652	0.155	0.385	0.095	0.416	0.290	0.0029	砂壤土	0.134	0.982	0.015
13	1.109	0.460	0.487	0.099	0.184	0.592	0.0001	粉 土	0.149	0.967	0.025
14	1.352	0.117	0.476	0.058	0.220	0.465	0.0033	砂粉土	0.344	0.982	0.030
15	1.528	0.211	0.456	0.074	0.154	0.430	0.0027	粉 土	0.243	0.988	0.025
16	1.541	0.200	0.420	0.064	0.316	0.398	0.0020	砂壤土	0.128	0.977	0.030
17	1.444	0.216	0.431	0.064	0.187	0.428	0.0027	粉 土	0.570	0.955	0.080
18	1.521	0.194	0.394	0.047	0.240	0.483	0.0001	砂粉土	0.102	0.961	0.050
19	1.501	0.216	0.416	0.049	0.217	0.486	0.0004	砂粉土	0.321	0.948	0.050
20	1.432	0.138	0.430	0.072	0.338	0.312	0.0017	砂壤土	0.105	0.982	0.010
21	1.439	0.190	0.435	0.080	0.167	0.434	0.0032	粉 土	0.441	0.965	0.060
22	1.424	0.182	0.476	0.054	0.029	0.588	0.0044	粉 土	0.103	0.972	0.008
23	1.365	0.159	0.477	0.083	0.122	0.559	0.0029	粉 土	0.171	0.983	0.010
24	1.315	0.171	0.480	0.102	0.094	0.495	0.0033	粉 土	0.130	0.992	0.035
25	1.277	0.187	0.487	0.021	0.033	0.506	0.0037	粉 土	0.170	0.991	0.015
26	1.300	0.186	0.519	0.076	0.195	0.328	0.0055	壤 土	0.260	0.968	0.050
27	1.319	0.145	0.478	0.016	0.182	0.554	0.0041	粉 土	0.415	0.996	0.020
28	1.412	0.106	0.469	0.066	0.298	0.457	0.0003	砂粉土	0.211	0.991	0.020

## 2 简化 Philip 入渗模型

Kostiakov 入渗模型<sup>[16]</sup>和 Philip 入渗模型<sup>[17]</sup>是常用的两个比较简单的土壤入渗模型:

$$i = a_1 t^{-b} \quad (1)$$

$$i = 0.5A t^{-0.5} + i_c \quad (2)$$

式中  $i$  为入渗速率;  $t$  为入渗时间;  $a_1$ 、 $b$  为经验参数;  $A$  为吸渗率;  $i_c$  为稳定入渗率。

对比两个模型, 式(1)中参数  $b$  一般为 0.3~0.8, 均值为 0.5 左右, 变化幅度不大, 相应的式(2)中的指数为 -0.5(均质土壤), 这说明  $b$  主要反映了入渗土壤的均匀程度, 对大尺度土壤入渗来讲, 由于耕作方式的接近, 对土壤均匀程度的影响可能趋于一致, 因此参数  $b$  取常数 0.5, 对模型的拟合精度不会有太大的影响, 而对稳定入渗率项, 在入渗时间较短的情况下可以忽略。因此有以下简化 Philip 入渗模型:

$$i = i_c \quad (3)$$

式中  $i_c$  为入渗系数, 其余符号意义同前。

对 28 个点野外入渗资料按简化 Philip 入渗模型进行拟合(表 1), 取值范围为 0.1~0.9 mm/min<sup>1/2</sup>, 相关系数  $R$  都在 0.9 以上, 拟合精度较高, 说明该模型对野外原位不同初始含水量情况下的土壤水分垂直入渗是适用的。稳定入渗率取值范围为 0.01~0.1 mm/min。

简化 Philip 入渗模型的特点是只有一个参数(入渗系数  $i_c$ ), 不但表示了每一点的入渗特性, 还可作为表示入渗特性空间变化的变异系数, 避免了在研究空间变异时对入渗曲线的标定, 因此, 在有足够数据点的情况下, 可以直接实现土壤入渗的点面转化, 使空间变异的研究更直接更方便。

## 3 简化 Philip 入渗模型的土壤转换函数(PTFs)

20 世纪 70 年代以来, 许多学者对非饱和土壤水分运动参数与土壤物理化学性质的关系进行了广泛的研究, 建立了一些估算非饱和土壤水分运动特征参数的公式, 这些公式统称为土壤转换函数(Pedo-Transfer Functions, PTFs)<sup>[18~20]</sup>。土壤入渗作为土壤水分运动的一个特例, 其入渗特性参数也应该由土壤的基本理化性质决定, 因此建立简化 Philip 入渗模型中入渗系数与土壤物理化学性质的关系, 即土壤入渗特性参数的土壤转换函数, 基本可以解决大尺度土壤入渗参数测定难的问题。

野外土壤水分入渗特性不仅受土壤理化指标如: 容重、孔隙度、粘粒含量、砂粒含量、粗粉粒含量和有机质含量的影响, 而且还受土壤初始含水量的影响。根据实测资料分析(图 1、图 2), 土壤初始含水量对入渗系数和稳定入渗率的影响比较大, 而且以对数形式作用。

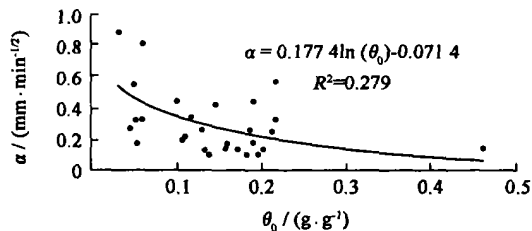


图 1 初始含水量  $\theta_0$  与入渗系数  $\alpha$  的关系

Fig. 1 Relationship between initial soil water content and infiltration coefficient

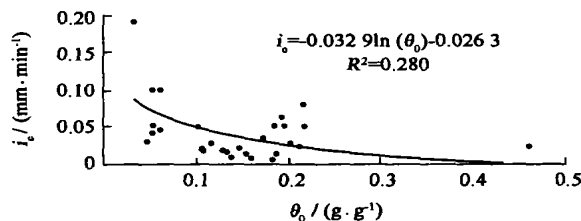


图 2 初始含水量  $\theta_0$  与稳定入渗率  $i_c$  的关系

Fig. 2 Relationship between initial soil water content and stable infiltration rate

以土壤理化指标和初始含水量为变量, 对  $\alpha$  和  $i_c$  建立多元二项式方程, 并转化为线性, 用 SPSS 软件进行处理, 并将部分对  $\alpha$  及  $i_c$  影响很小的变量予以剔除, 建立的土壤转换函数为

$$= -10.616 \theta_0 + 5.311 \ln \theta_0 + 0.936 (\ln \theta_0)^2 + 1.657 S_a - 4.018 S_a^2 - 6.596 S_i + 7.14 S_i^2 + 9.845$$

$$R = 0.721 \quad (4)$$

$$i_c = 0.174 \ln \theta_0 + 0.0428 (\ln \theta_0)^2 - 0.174 S_a + 0.268 S_a^2 + 0.342 S_i - 0.589 S_i^2 + 0.19$$

$$R = 0.750 \quad (5)$$

式中  $S_a$  为沙粒含量(重量百分数);  $S_i$  为粗粉粒含量(重量百分数);  $\theta_0$  为初始含水量(重量含水量)。入渗系数及稳定入渗率均与初始含水量、砂粒含量、粗粉粒含量关系密切,而容重、孔隙度、粘粒含量及有机质含量对其影响不大。

入渗系数与稳定入渗率  $i_c$  的土壤转换函数的相关系数分别为 0.721、0.750,显著性均达到 0.01。将由两个土壤转化函数(式(4)、式(5))根据表 1 的土壤理化参数计算的入渗参数与拟合的入渗参数进行了比较(图 3、图 4),计算值和拟合值比较接近,进步说明土壤转化函数是比较合理的。因此,土壤转换函数也可以应用于大尺度野外原位入渗特性参数的估算。

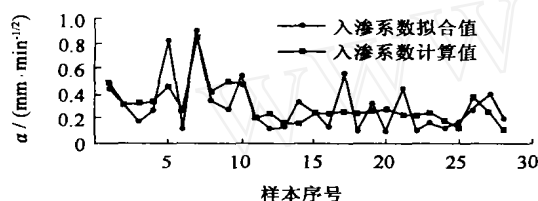


图 3 入渗系数计算值与拟合值的比较

Fig. 3 Comparison between calculated and calibrated infiltration coefficient

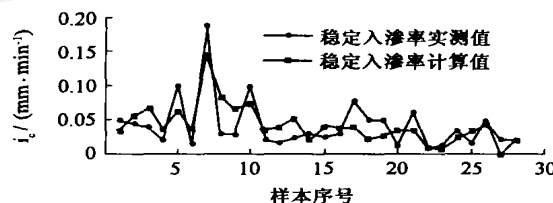


图 4 稳定入渗率计算值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison between calculated and measured stable infiltration rate

## 4 石羊河流域土壤水分入渗特性的空间变异

### 4.1 石羊河流域土壤水分入渗参数的空间分布

利用 ARCVIEW 软件的 ANALYSIS 和 SURFACE 功能,按反距离加权法(IDW)绘制了石羊河流域平原区简化 Philip 入渗模型入渗系数和土壤稳定入渗率  $i_c$  的空间分布图(图 5、图 6)。两个参数均采用了 67 个点的数据,包括 28 个点的实测数据,其余为根据《武威地区土壤》(1988 年)提供的部分土壤理化参数、实际测试的部分土壤理化参数,利用土壤转换函数(式(2)和式(3))生成的数据。

为了便于分析和比较,入渗系数及稳定入渗率均利用土壤转换函数转化为初始含水量为 0.03 g/g 时的数值。然而土壤初始含水量在整个流域上是随着时空变化而变化的,因此,在已知任意时刻的初始含水量空间分布的情况下,也可通过土壤转换函数将初始含水量为 0.03 g/g 时的入渗参数分布图转化为该时刻的入渗参数分布图。

土壤入渗特性曲线表现为一簇一簇的曲线,不能直接生成空间分布图,而简化 Philip 入渗模型中的唯一的参数入渗系数不但可以代表这些曲线,而且还可以直接表示入渗曲线空间变异的变异系数,因此单一参数模型在绘制空间分布图和进行空间变异分析时具有不可替代的优势。

### 4.2 土壤水分入渗特性的空间变异特征

石羊河流域平原区土壤入渗曲线由简化 Philip 入渗模型中的入渗系数来表示,也可由  $\alpha$  表示入渗特性的空间变异系数。初始含水量为 0.03 g/g 时,  $\alpha$  取值 0.75 ~ 1.65 mm/min<sup>1/2</sup>,在流域中部(凉州区)地区最大,然后向南(古浪县)和向北(民勤县)递减,中部和北部土壤偏沙性,参数  $\alpha$  的值比较大,一般都超过了 1.3 mm/min<sup>1/2</sup>,而南部地区基本上小于 1.0 mm/min<sup>1/2</sup>。

初始含水量为  $0.03 \text{ g/g}$  时, 石羊河流域稳定入渗率取值为  $0.06 \sim 0.20 \text{ mm/min}$ 。稳定入渗率有着和 类似的分布规律, 表现为在流域中部地区最大, 然后向南和向北依次减小, 中部和北部, 稳定入渗率超过了  $0.15 \text{ mm/min}$ , 而南部地区普遍小于  $0.12 \text{ mm/min}$ 。

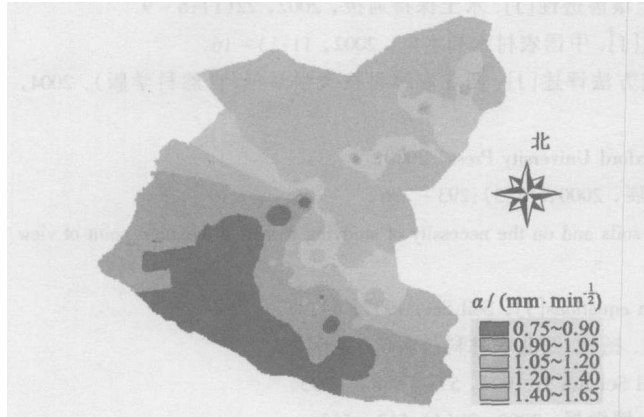


图5 土壤入渗系数分布图

Fig. 5 Distribution map of infiltration coefficient

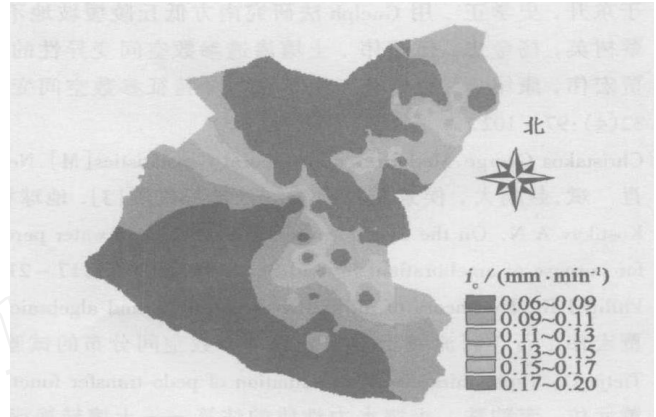


图6 土壤稳定入渗率分布图

Fig. 6 Distribution map of stable infiltration rate

## 5 结 论

简化 Philip 入渗模型只有一个参数, 形式简单, 有较高的精度, 适用于野外原位入渗情况, 模型参数入渗系数 能够代表每一入渗曲线, 可作为入渗特性空间变异的变异系数, 表示土壤入渗的空间特征。

石羊河流域土壤入渗的 PTFs 表明, 入渗系数 和稳定入渗率主要受初始含水量、砂粒含量、粗粉粒含量的影响, 尤其初始含水量的影响比较大, 而容重、粘粒含量及有机质含量等对其影响较小。土壤入渗的土壤转换函数具有较高的拟合精度, 可直接从土壤理化参数估算土壤入渗特性参数, 基本解决了大尺度区域土壤入渗参数测试难的问题。目前区域地形地貌、土地的不同利用方式等对土壤入渗的影响有了较广泛的研究, 如何将 这些方面引入到 PTFs, 对于深入研究土壤入渗机理及提高土壤入渗特性的预测精确具有重要意义。

土壤水分入渗的简化 Philip 入渗模型与土壤转换函数相结合, 可解决大尺度区域单点入渗向面的转化及入渗参数大规模测定难的问题, 以此绘制的土壤入渗参数的空间分布图表明, 石羊河流域土壤入渗特性在空间分布上具有明显的规律性, 也说明了简化 Philip 入渗模型与土壤转换函数适合大尺度土壤入渗空间变异的研究。

## 参考文献:

- [1] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1988. 77 - 131, 321 - 376.
- [2] 李长兴. 土壤特性空间变异对流域下渗影响得研究综述[J]. 陕西水利, 1989(4): 7 - 9.
- [3] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 66: 197 - 205.
- [4] Steven L. Geiger, Deanna S Durnford. Infiltration in homogenous sands and a mechanistic model of unstable flow[J]. Soil Sci Am J, 2000, 64: 460 - 469.
- [5] 解文艳, 樊贵胜. 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.
- [6] 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): 88 - 96.
- [7] 袁建平, 雷廷武, 郭索彦, 等. 黄土丘陵区小流域土壤入渗速率空间变异性[J]. 水利学报, 2001(10): 88 - 92.
- [8] 夏江宝, 杨吉华, 李红云. 不同外界条件下土壤入渗性能的研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 115 - 117.

- [9] Dao T H. Tillage and wite wheat residue management effects on water infiltration and storage[J]. Soil Sci Am J, 1993, 57:1586 - 1594.
- [10] Wang Z, Wu Q J, Wu L, *et al.* Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability[J]. Journal of Hydrology, 2000, 231/232:265 - 276.
- [11] 于东升, 史学正. 用 Guelph 法研究南方低丘陵缓坡地不同坡位土壤渗透性[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1):6 - 9.
- [12] 蔡树英, 杨金忠, 伍靖伟. 土壤渗透参数空间变异性的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2002, 11:13 - 16.
- [13] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓. 土壤水力学特征参数空间变异的研究方法评述[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(4):97 - 102.
- [14] Christakos George. Modern Spatiotemporal Geostatistics[M]. New York:Oxford University Press, 2000.
- [15] 肖 斌, 赵鹏大, 侯景儒. 地质统计学新进展[J]. 地球科学新进展, 2000, 15(3):293 - 296.
- [16] Kostikov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purpose of amelioration[J]. Soil Sci, 1932, 97(1):17 - 21.
- [17] Philip J R. The theory of infiltration 4. sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Sci, 1957, 84:257 - 264.
- [18] 贾宏伟. 石洋河流域土壤水分运动参数空间分布的试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2004.
- [19] Tietje O, Tapkenhinrichs M. Evaluation of pedo-transfer function[J]. Soil Sci Am J, 1993, 57:1088 - 1095.
- [20] 黄元仿, 李韵珠. 土壤水力性质的估算——土壤转换函数[J]. 土壤学报, 2002, 39(4):517 - 523.

## Spatial variability of soil water infiltration in the plain of Shiyang river basin<sup>\*</sup>

JIA Hong-wei<sup>1,2</sup>, KANG Shao-zhong<sup>1,3</sup>, ZHANG Fu-cang<sup>1</sup>, TONG Ling<sup>1</sup>, YAO Li-min<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest

Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China;

2. Institute of Hydraulic & Estuary, Hangzhou 310020, China;

3. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The spatial variability of the regional soil water infiltration is one of key issues now, yet there is no better ways to solve it. Based on the experiment data, the simplified Philip model of soil water infiltration and the pedo-transfer functions (PTFs) are established. By using ARCVIEW software, the distribution of infiltration parameters of the plain region of Shiyang river basin are drawn by these two models and the spatial characteristics are analyzed. The results indicate that the simplified Philip model is suitable for the study of transfer from points to region, the PTFs of the infiltration coefficient can simply calculate the infiltration parameters, the combination of the simplified Philip model and the PTFs is the simple and beneficial method for the research of the spatial variability of the soil water infiltration characteristics of the large-scale region.

**Key words:** soil water infiltration; simplified Philip model; Pedo-Transfer Functions; spatial variability; Shiyang river basin

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 90202001, No. 50339030).