

土壤水力学特征参数空间变异的研究方法评述*

贾宏伟, 康绍忠, 张富仓

(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] 对非饱和土壤水力学特征参数空间变异的标定理论、随机理论、土壤传递函数、分形理论和统计方法等5种研究方法作了比较全面的介绍, 分析了各种方法的优点和局限性, 指出了土壤水力学特征参数空间变异研究中需要解决的参数测定、模型系数单一化和参数空间变异特征3个关键问题, 认为多种方法相结合是研究土壤水力学特征参数空间变异尤其是大尺度空间变异的有效途径。

[关键词] 土壤水力学特征参数; 空间变异; 研究方法

[中图分类号] S152.7⁺2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)04-0097-06

近代土壤水分运动的研究起源于1856年Darcy定律的提出。随着科学技术的发展和生产实践的需要, 其研究经历了一个由微观到宏观、由小尺度到大尺度的发展过程。由于土壤特性空间分布的非均一性即空间变异性, 土壤水力学特征参数在空间分布上也表现出空间变异性。研究不同尺度土壤水力学特征参数空间分布及其空间变异, 是进一步研究土壤水分运动和溶质运移的理论基础和前提, 也是当前解决区域生态水文转化、环境污染、生态安全及水资源合理调配等问题的关键。近几十年来, 各国学者对不同尺度土壤水力学特征参数的空间变异进行了探讨^[1~5], 虽尚未形成比较成熟统一的研究方法, 但均从不同角度进行尝试^[2~6], 如标定理论、随机理论、土壤传递函数、分形理论和统计方法等。现对这些研究方法进行评述和综述, 以期为非饱和土壤水力学特征参数及其空间变异的研究提供参考。

1 标定理论

由于田间土壤空间变异性的存在, 用数学物理方程建立起来的土壤水分运动模型要在田间应用, 最常用的方法就是对土壤水分运动参数进行标定(Scaling), 标定理论是将几何相似定律引入非饱和土壤水分运动而发展起来的, 有以下基本关系:

$$a_i \Psi_i = \bar{\Psi}, \quad (1)$$

$$K_i(\Theta)/a_i^2 = \bar{K}, \quad (2)$$

式中, $\bar{\Psi}$, $\bar{K}$ 分别为基质势、导水率的标定值; a_i 为标定系数; Ψ_i , $K_i(\Theta)$ 为第 i 点的基质势和导水率。标定就是对每一点确定适当的标定系数 a_i , 由统计学方法计算出 a_i 的统计特征, 通过 a_i 的统计特征和空间相关结构来描述田间的变异情况^[1,6]。

在标定系数的计算上, Warrick 等^[7]提出了基于回归迭代的方法; 雷志栋等^[1]提出一次法; Clausenitzer 等^[6]将牛顿互除法引入标定系数的计算, 并且可以同时标定土壤水分特征曲线和导水率曲线。以上方法虽然计算过程复杂, 但精度较高。William s 和 Ahuja^[8]根据相似介质的标定理论提出了一种简单求解标定系数的方法, 即

$$S_i(\Psi) = (a_i \Psi / A)^{-1/M}, \quad (3)$$

$$a_i = (A / \Psi^*) S_i^{-M}, \quad (4)$$

$$A = N \Psi^* / \sum S_i^{-M}, \quad (5)$$

式中, a_i 为标定参数; N 为测点数; $\Psi^* = -33$ kPa; A, M 为系数; S_i 为有效容水度。 S_i 选取接近平均点的数值, 可得到完整的 $S \sim \Psi$ 曲线, 曲线的斜率即为 $-1/M$ 。依次由公式(5)可以得到 A 值, 由公式(4)可以得到 a_i 值, 然后由公式(3)可以推求各点的 $S_i \sim \Psi$ 曲线。该方法在精度要求不很高时比较方便。

应用标定理论解决田间实际问题还不多见, Warrick 和 Hussen^[9]标定了 Richards 方程:

* [收稿日期] 2003-10-14

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(50339030); “中国西部环境与生态科学重大研究计划”项目(90202001); 教育部科学技术研究重点项目(重点02075)

[作者简介] 贾宏伟(1971-), 男, 陕西蓝田人, 在读硕士, 主要从事土壤水分运动及节水灌溉研究。

$$\frac{\partial \Theta^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial t^*} \left[K^* \frac{dh^*}{d\theta^*} \frac{\partial \Theta^*}{\partial z^*} \right] - \frac{\partial K^*}{\partial z^*}, \quad (6)$$

式中, $K^* = (\theta^*)^v$; $h^* = -(\theta^*)^{-m}$ 。扩散率 $D^* = m \cdot (\theta^*)^{v-m-1}$ 。可见, 运动参数的变异依赖于参数 m, v 值。在田间入渗和排水情况下通过求解 Richards 标定方程, 得到了土壤水分运动的动态特征, 而标定系数对土壤水分运动动态特征的影响还需进一步探讨。

因土壤并不完全遵守几何相似, 以几何相似为基础的标定理论只适用于同一质地的田间范围, 适用范围受到限制。

为了将标定思想扩展到不同土壤和更大尺度, 许多学者又进行了进一步的研究^[6,7]。Deurer 和 Duijnsveld^[10]在研究砂质土壤松树林的水分运动参数空间分布时, 应用 Van Genuchten 公式^[11]在水平方向进行了线性标定, 即 $h^* = a_{scale}^{-1}h$, 而在垂直方向进行非线性标定, 即 $\bar{n} = \beta_{scale}^{-1}n$, 式中, h 为吸力; n 为参数; $\bar{n}$ 是 n 的中间值。水平方向相关尺度 0.15 m, 垂直方向相关尺度 0.2 m。由于土壤在垂直方向发展和层化并不完全遵守几何相似, 因此用非线性标定比较合理。

Gregson 等^[12]发现, Brooks-Corey 模型的对数形式中 $\ln[-\Psi(\theta)] = a + b \ln(\theta)$, 模型参数 a, b 对不同的土壤均有很好的相关关系 $a = p + qb$, 其中 p, q 为拟合系数, 对不同的土壤, 其值接近常数, 因有:

$$\ln[-\Psi_i(\theta)] = p + b[\ln(\theta) + q], \quad (7)$$

该模型中只有 1 个参数 b , 土壤水分特征曲线随 b 值的变化而变化。Ahuja 和 Williams^[13]将上式改写为:

$$\ln(\theta) = \{\ln[-\Psi(\theta)_i - p]/b_i - q\} = \text{scaled } \ln[-\Psi_i(\theta)], \quad (8)$$

式中, b_i 为 i 点的标定系数。该式即为土壤水分特征曲线的标定公式, 同理可得导水率曲线的标定公式:

$$[\ln(K_i) - P]/B_i - Q = \text{scaled } \ln[K_i(\Psi)] = \ln(-\Psi), \quad (9)$$

式中, B_i 为 i 点的标定系数; Q 为常数。Ahuja 等^[13]利用(8)和(9)式对美国不同地方的土壤进行了验证, 结果比较满意。该方法突破了相似介质的约束, 适合大尺度土壤水力学特征参数空间变异的研究。

标定理论是研究土壤水力学特征参数空间变异比较简单而有力的工具, 是处理水力学特性空间变异的一种经验方法, 可以满足田间尺度的需要。为了突破相似介质的限制, 其理论虽然在不同质地土壤

水分运动中作了一些尝试, 但在大尺度方面还有待进一步研究和完善。

2 随机理论

土壤水力学特征参数既具有统计特征又具有空间变异结构, 适合用随机场理论描述其空间变异特征。用随机场理论来描述大尺度非饱和土壤水分运动的基本方程为:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = C^* \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{[K_{ij}^* \frac{\partial(H+z)}{\partial z}]}{\alpha_i}, \quad (10)$$

式中, Θ, H 表示大尺度非饱和水流宏观运动特征的变量; C^*, K_{ij}^* 分别为非饱和有效容水度和有效水力传导度, 集中反映介质特性空间变异的随机统计特征^[2,14]。

一些学者对土壤水力学模型参数进行了随机描述^[2,14~16], 其中一种简单的参数结构为^[14]:

$$C^* = \Gamma + \mathcal{Y}, \Gamma = E(C^*), E(\mathcal{Y}) = 0 \quad (11)$$

$$\alpha(H) = A + \alpha_a, A = E(\alpha^*), E(a) = 0 \quad (12)$$

$$\ln K^* = Y + y, Y = E(\ln K^*), E(y) = 0 \quad (13)$$

其中, C^* 和 K^* 含义同前; Γ, A, Y 为均值部分; $\mathcal{Y}, a, y$ 为随机扰动分值; $\alpha(H)$ 为 $\ln[K(\Psi)] \sim \Psi$ 曲线在 $\Psi = H$ 时的斜率。

随机理论中土壤水分特征曲线和非饱和导水率的标定公式分别为:

$$\Psi(\theta, x) = \bar{\Psi}(\theta)/a(x), \quad (14)$$

$$K(\theta, x) = \bar{K}(\theta)/a(x)^2, \quad (15)$$

式中, $\bar{\Psi}, \bar{K}$ 分别为 Ψ, K 的标定值, 不随空间位置的变化而变化; $a(x)$ 为标定系数, 服从对数正态分布。介质的空间变异性是由空间位置变异的标定系数 $a(x)$ 的统计特征来表征的, 即标定变异^[17]。黄冠华、沈荣开^[18]将标定系数 $a(x)$ 看作一维随机空间函数, 用随机生成模型生成了 $a(x)$ 的随机样本, 经统计分析得到其统计特征值。

随机方法在理论上比较好地反映了空间变异对水流运动的影响, 尤其能得到与研究尺度相适应的水力学特征参数; 其标定理论来源于几何相似, 应用尺度受到限制, 目前的研究仅局限在田间水平上; 随机理论面临样本的采样问题而且解析解结构复杂, 应用于实际问题时有较大的难度; 虽然目前的研究较少, 但普遍认为随机理论具有很好的发展前景。

3 土壤传递函数

土壤传递函数 (Pedo-Transfer Functions, PTFs) 是利用容易获得的土壤理化参数估算土壤水分运动特征参数的一种方法。一般根据土壤类型给出 $\Psi \sim \theta$ 和 $K \sim \theta$ 关系经验模型参数的经验值, 或建立这些模型参数与土壤质地的关系式。由于土壤水力学特征参数本质上是由土壤质地决定的, 因此土壤传递函数具有一定的合理性。

20 世纪六七十年代以来, 许多学者对土壤传递函数作了大量研究^[3, 19, 20]。由于区域土壤理化性质的差异, 土壤质地、有机质、容重、矿物质等因子对空间变异的影响不一致, 因此土壤传递函数的形式较多, 比较常见的是对残余含水量 θ_r 、饱和含水量 θ_s 、饱和导水率 K_s 的对数 $\lg K_s$ 、Van Genuchten 模型参数 n 的对数 $\lg n$ 等进行线性或高次多项式的拟合, 相关系数一般在 0.7 以上^[19~22]。今后研究的重点是土壤理化参数与水力学参数的关系, 进而寻求统一的土壤传递函数形式, 使其具有通用性。

在尺度研究上, 应用土壤传递函数估算土壤水力学特征参数克服了实测数据不足的缺点, 适于大尺度上的研究。许多学者对此进行了探讨^[21~24], 普遍认为对于小比例尺区域的土壤水力学性质, 进行大量高精度的测试是没有必要的, 一些粗略的估算公式完全可以满足区域土壤水盐运移模拟计算的要求。

将标定理论和土壤传递函数相结合, 使空间变异的研究更加方便。Daamen 等^[25]在 2 hm^2 小流域上将标定理论用于 Simmons 模型, 有以下公式:

$$\Phi = 1 + \ln[1/(1 + h/a_i)^{b_i}], \quad (16)$$

$$h(\Phi) = S F_i h_i(\Phi), \quad (17)$$

$$a_i = a_m / S F_i, \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^N S F_i = N, \quad (19)$$

式(16)即为 Simmons 模型, 式中, Φ 为有效饱和度; a_i, b_i 为每点的参数; a_m 为 a_i 的均值; $S F_i$ 为标定系数; N 为总孔数。利用土壤特性回归出 a_i, b_i 的关系式, 由(16)式可以得到土壤水分特征曲线, 并由(18)式可以直接计算标定系数, Daamen 也提出了该地区标定系数与土壤特性关系式。标定理论和土壤传递函数结合使用, 克服了试样大量采集测试的困难, 而且由土壤特性直接得到标定系数, 在计算上也更

加方便。

土壤传递函数避免了水力学参数的大量实地测试, 精度较高, 在大尺度上也有较好的应用, 是研究大尺度土壤水力特征参数空间变异相对可行的方法。这一方面的研究比较多, 但多为经验公式, 理论上尚感不足, 尤其在土壤因子对水力学模型参数的影响方面还有待深入研究。

4 分形理论

分形理论从 20 世纪 60 年代发展到今天, 已成为研究具有非规则性和自相似性客观对象的有力的数学工具。分形维数反映了研究对象的复杂程度, 是描述分形特征的重要参数。土壤是一个多相非均质的多孔介质, 土壤粒径分布、孔隙大小、空隙连通状况、颗粒表面积等都具有分形特征(自相似性)^[26], 适宜用分形理论来描述。20 世纪 80 年代, 分形理论被引入到土壤学科, 随后又被逐步地引入到土壤水力学参数的研究中。

Tyler 和 Wheatcraft^[4]由土壤孔隙体积空间分布上的自相似性, 推导出了用土壤孔隙分形表示的 $\theta \sim \Psi$ 关系式:

$$\theta/\theta_s = (\Psi/\Psi_o)^{D_s^{-2}}, \quad (20)$$

式中, θ 为饱和含水量; Ψ_o 为进气压力; D_s 为土壤孔隙分形维数。

Toledo 等^[27]利用分形几何和薄膜理论, 推导出土壤持水曲线和非饱和导水率曲线与分形维数的关系式: $\theta = \Psi^{D_s^{-3}}; K = \theta^{3/[m \cdot (3-D_s)]}$, 指数 $m \approx 0.48, D_s$ 为土壤孔隙或颗粒表面分形维数, 一般取值为 2.1~2.7。

Rieu 和 Spósito^[28]建立了具有结构质量分形的土壤持水曲线模型:

$$\theta = \theta_s - 1 + (\Psi/\Psi_o)^{D_m^{-2}}, \quad (21)$$

式中, D_m 为质量分维, 一般砂土取 2.76, 粉砂粘土取 2.9, 粘土取 2.99。

关于分形维数的计算方法, Tyler 和 Wheatcraft^[29]在假定土壤颗粒的质量不变, 且不考虑土粒形状差异的基础上, 建立了土壤颗粒累计质量与粒径的关系。杨培岭等^[30]在此基础上推导出土壤颗粒质量与粒径分维的关系式, 使分形维数的计算能直接利用土壤颗粒的机械组成来完成。Kravchenko Alexandra 等^[31]也推导出了土壤颗粒级质量、粒径与土壤表面分形维数的关系式。

对不同土壤分形维数的研究表明, 分形模型的实测值、拟合值和预测值都十分接近, 维数的大小与土壤质地密切相关, 随着土壤粘粒含量的增加及砂粒含量的减少, 分形维数逐渐增大^[21, 32~34]。

土壤结构的分形维数不仅反映了土壤颗粒大小的影响, 而且体现了土壤质地的均一程度^[32]; 土壤颗粒分布的分形维数反映了不同质地土壤颗粒的填充能力^[34]; 作者认为, 土壤颗粒的分形维数反映了不同粒径级别土壤颗粒组成的级配关系。

分形维数赋予了非饱和土壤水力学特征参数经验模型以物理意义, 使这些模型更加科学, 也反映了区域土壤结构质地的空间变异, 适合于土壤水分运动参数空间变异的研究^[35~37]。但分形模型尚未考虑土壤颗粒表面化学性质、流体等的影响^[38]和尺度方面的扩展, 因而, 土壤水力学特征参数分形模型的理论及其在尺度方面的应用还有待于进一步研究。

5 统计方法

统计方法是研究土壤空间变异的一种最基本的方法。土壤水力学参数的空间变异性一般是由参数的统计特征(均值、标准差及变差系数)与空间的相关结构来描述, 且其统计特征与相关结构是根据参数的实测样本进行推求的^[39]。这些年来, 统计方法在土壤水力学参数空间变异方面的应用有很大的发展。

若将土壤的空间分布看作是随机的, 则测定的土壤水力学参数或模型的系数也是随机的、相互独立的变量, 用经典统计学进行分析, 得到土壤水力学参数或其系数的统计特征, 以此来反映参数空间变异的程度。黄冠华^[5]对国内外的试验研究进行了总结, 结果发现大多数水力学参数特征符合对数正态分布和正态分布。

土壤特性在空间分布上既具有随机性, 又具有一定的相关关系。很明显, 经典统计学不能得到土壤水力学参数的空间分布和空间变异结构。20 世纪 60 年代以来, 随着地质统计学的发展, 将 Kriging 插值法引入到土壤空间变异的研究, 其本质上是线性无偏估计, 能够估计参数的空间变异分布和方差分布, 半方差也反映了参数之间的空间变异结构。将土壤特性(水力学参数)看作空间位置的函数, 用 Kriging 插值法可以得到水力学参数的空间分布特征。地质统计学适用于研究随机性和结构性变量在空间的分

布问题, 适合土壤水力学特征参数空间变异的分析。目前, 地质统计学又提出了协同区域化理论, 用于研究具有统计相关和时空位置相关的反映多元信息时空结构的现象, 这些新理论和新方法可以逐步引入到土壤空间变异的研究中。

目前, 土壤水力学特征参数空间变异结构方面的研究中, 田间尺度一般为 20~100 m, 非饱和水力学模型中参数的相关尺度大多在 2~20 m, 相关尺度一般随研究区域尺度的增大而增大^[5, 40, 41], 主要原因是尺度不同, 影响空间变异的主要因子及因子对变异的影响不同, 而对更大尺度空间变异结构的研究急需加强。

统计方法要对实测值进行统计分析, 而土壤水力学特征参数在大尺度上的测试很困难, 所以统计方法的作用受到一定限制。若将统计方法与标定理论、分维方法、随机理论和土壤传递函数相结合, 发挥其优势, 才能在更大尺度上反映土壤水力学特征参数空间变异的特征。

6 展 望

研究土壤水力学特征参数空间变异, 主要需要解决 3 个关键问题, 一是大尺度土壤水力学特征参数的测定问题。通常通过取样的方法获取土壤水力学特征参数不仅费时费力, 尤其对大尺度几乎不可能成功, 研究趋势表明, 根据土壤传递函数和分形理论可以很方便的估计土壤水力学参数值; 二是参数模型的单一系数问题。土壤水力学特征参数模型中一般含有两个以上的系数, 在研究空间分布时需要转化成单一系数, 标定理论和分形理论为此提供了比较好的方法; 第三是参数的空间变异特征和空间变异结构问题。该问题可借助随机理论和统计方法来解决。土壤水力学特征参数空间变异的各种研究方法, 均有自己的特点和局限性, 相互之间都有密切的联系, 甚至不可完全分开, 如统计方法和随机理论。完整描述土壤水力学特征参数的空间变异, 往往需要多种方法相结合。

土壤水力学特征参数的空间变异是一个十分复杂的问题, 其研究方法仍在探索和完善过程中, 还有大量的基础性研究需要展开, 尤其是大尺度的相关尺度与变异结构问题、不同尺度对参数空间分布的精度要求及空间变异研究结果的评价方法等。

在区域尺度水平上, 考虑的问题往往更加复杂,

气候分布、植被分布和地形分布等均有显著影响,需要逐步展开研究。地理信息系统、卫星定位系统和遥感等新技术在大尺度上的应用也是今后发展的一个方向。

[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
- [2] 黄冠华, 沈荣开. 大尺度非饱和土壤水分运动的随机模型及有效参数的结构分析[J]. 水利学报, 1997, (11): 39- 48
- [3] 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
- [4] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal processes in soil water retention[J]. Water Resources Research, 1990, 26(5): 1047- 1054
- [5] 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
- [6] Clausnitzer V, Hopmans J W, Nielsen D R. Simultaneous scaling of soil water retention and hydraulic conductivity curves[J]. Water Resources Research, 1992, 28(1): 19- 31
- [7] Warrick A W, Mullen G J, Nielsen D R. Scaling field measured soil hydraulic properties using a similar media concept[J]. Water Resources Research, 1977, 13: 355- 362
- [8] Williams R D, Lahujar L R. Evaluation of similar media scaling and a one-parameter model for estimating the soil water characteristic[J]. Journal of Soil Science, 1992, 43: 237- 248
- [9] Warrick A W, Hussen A A. Scaling of Richards' equation for infiltration and drainage[J]. Soil Soc Am J, 1993, 57: 15- 18
- [10] Deurer M, Duijnisveld W H M. Spatial analysis of water characteristic functions in sandy podzol under pine forest[J]. Water Resources Research, 2000, 136(10): 2925- 2935
- [11] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Soc Am J, 1980, 44: 892- 898
- [12] Gregson K, Hector D J, McGowan M. A one-parameter model for the soil water characteristic[J]. Journal of Soil Science, 1987, 38: 483- 486
- [13] Ahuja L R, Williams R D. Scaling water characteristic and hydraulic conductivity based on gregson-hector-mcgowan approach[J]. Soil Soc Am J, 1991, 55: 308- 319
- [14] Mantoglou A. A theoretical approach for modeling unsaturated flow in spatially variable soil: effective flow models in finite domains and nonstationarity[J]. Water Resources Research, 1992, 28(1): 251- 267
- [15] Mantoglou A, Gelhar L W. Stochastic modeling of large-scale transient unsaturated flow system[J]. Water Resources Research, 1987, 23(1): 37- 67
- [16] Russo D, Bouton M. Statistical analysis of spatial variability in unsaturated flow parameters[J]. Water Resources Research, 1992, 28(7): 1911- 1925
- [17] 杨金忠, 蔡树英, 黄冠华, 等. 多孔介质中水分及溶质运移的随机理论[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [18] 黄冠华, 沈荣开. 非均质土壤中二维非饱和土壤水分运动的随机分析[J]. 水科学进展, 1997, 8(2): 117- 121
- [19] Cosby B J, Hornberger G M, Hornberger A. statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soil[J]. Water Resources Research, 1984, 20: 682- 690
- [20] Saxton K E, Rawls W J, Hornberger J S. Estimating generalized soil water characteristic from texture[J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 5: 1031- 1036
- [21] 王文焰, 王全九, 张建丰, 等. 甘肃秦王川地区土壤水分运动参数及相关性[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 110- 113
- [22] Wosten J H M, Van Genuchten M T. Using texture and other properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions[J]. Soil Soc Am J, 1988, 52: 1762- 1770
- [23] 朱安宁. 封丘土壤水力学性质及其土壤传递函数的研究[D]. 江苏南京: 南京农业大学, 2000
- [24] Rawls J R, Pachepsky Y A. Using field topographic descriptors to estimate soil water retention[J]. Soil Science, 2002, 167(7): 423- 435
- [25] Daamen C C, Xiao Zhenhua, Robinson J A. Estimation of water-retention function using scaling theory and soil physical properties[J]. Soil Soc Am J, 1990, 54: 8- 13
- [26] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用[J]. 土壤学进展, 1994, 22(1): 1- 9
- [27] Toledo P G, Novy R A. Hydraulic conductivity of porous media at low water content[J]. Soil Soc Am J, 1990, 54: 673- 679
- [28] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties[J]. Soil Soc Am J, 1991, 55: 1231- 244
- [29] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Soc Am J, 1992, 56: 362-

369

- [30] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用颗粒的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896- 899
- [31] Kravchenko A lexandra, Zhang Renduo. Estimating the soil water retention from particle-size distribution and water retention scaling[J]. Soil Science, 1998, 163(3): 171- 179
- [32] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 490- 496
- [33] 徐绍辉, 刘建立. 估计不同质地土壤水分特征曲线的分形方法[J]. 水利学报, 2003, (1): 99- 106
- [34] 刘云鹏. 土壤结构的分形特征及土壤水分运动模型研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2002
- [35] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Soc Am J, 1989, 53(4): 987- 996
- [36] Arya L M, Leij F J, Van Genuchten M T, et al. Scaling Parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data[J]. Soil Soc Am J, 1999, 63: 510- 519
- [37] 詹卫华, 黄冠华. 土壤水力特性分形特征研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 457- 462
- [38] 刘建国, 聂永丰. 非饱和土壤水力参数预测的分形模型[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 99- 106
- [39] 黄冠华, 谢永华. 非饱和水分运动参数空间变异与最优估值研究[J]. 水科学进展, 1999, 10(2): 101- 106
- [40] 薛绪掌, 张仁铎, 桂胜祥. 测定尺度对所测土壤导水参数及其空间变异性的影响[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 47- 51
- [41] Reynolds W D, Zebchuk W D. Hydraulic conductivity in a clay soil: two measurement techniques and spatial characteristics[J]. Soil Soc Am J, 1999, 60: 1679- 1685

A review of study methods on spatial variability of soil hydraulic properties

JIA Hong-wei, KANG Shao-zhong, ZHANG Fu-cang

(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, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This paper introduced the five kinds of study methods, such as are scaling theory, stochastic theory, PTFs, fractal theory and statistics methods on spatial variability of unsaturated soil hydraulic properties, and analysed the advantages and limits of these methods. The three key problems that need to be resolved were pointed out which were parameter determination, stereotyped coefficient and properties of spatial variability. This paper also suggested that the combination of the various methods is the valid means to study spatial variability of soil hydraulic properties, especially in large scales.

Key words: soil hydraulic properties; spatial variability; study methods