

文章编号:1001-8166(2008)06-0613-06

非饱和土壤水分运动参数空间变异性 研究进展与展望*

宋孝玉, 李亚娟, 蒋俊, 马玉霞

(西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:非饱和土壤水分运动参数的空间特征是科学认识大尺度土壤水分动态变化的基础和先决条件。在参考国内外大量文献的基础上, 对非饱和土壤水分运动参数的研究进展从模型研究到空间尺度研究进行了分析与评述, 指出机理模型研究是未来土壤水分运动参数空间变异性研究的方向, 而尺度研究目前研究的精度不够; 在对土壤水分运动参数的空间变异性研究各类方法分析和归纳后, 指出土壤水分运动参数变异性研究的方法包括直接测定方法和间接估计方法两种, 并对各种方法的优缺点及适用条件进行了总结; 最后指出土壤水分运动参数空间变异性研究存在的问题主要集中在土壤水分运动参数的空间变异性结果的标准化问题和不同尺度土壤水分运动参数的相互转化等问题。

关键词:土壤水分运动参数; 空间变异; 研究方法

中图分类号:S152.7 **文献标志码:**A

土壤水分运动是生态水文循环的重要环节, 而非饱和土壤水分运动参数的空间特征是科学认识大尺度土壤水分动态变化的基础和先决条件。但由于土壤特性的空间变异, 用数学物理方程建立起来的点上的土壤水分运动模型, 在大尺度区域上的运用受到极大的限制^[1]。研究不同尺度土壤水分运动参数空间分布和空间变异, 是进一步研究土壤水分运动规律和溶质运移规律的理论基础和科学前提, 也是当前解决区域生态水文过程、环境污染、生态安全及水资源合理配置等问题的关键。

1 研究方法与分析

土壤的各种特性在空间分布上既有连续性, 又有变异性。20世纪70年代土壤特性空间变异性的研究逐渐受到关注, 以后这个概念逐步引入到土壤水分运动领域中, 并成为土壤学、水文学的一个研究

热点。土壤水分运动参数包括水分特征曲线、导水率和扩散率。它表征了土壤本身的性质和特征, 是应用数学物理方法定量分析研究土壤水分运动的必不可少的资料, 也是进行土壤水分运动数学模拟必不可少的依据。进行土壤水分运动参数变异性研究的方法包括直接测定方法和间接估计方法两种。

1.1 直接测定方法

直接测定土壤水力性质的方法分实验室和田间方法两种方式。

实验室内测定土壤水分特征曲线的方法主要有张力计法、压力膜法和离心机法等。试验所用土柱既可以是扰动的也可以是原状的。而田间原位测定土壤水分特征曲线的方法大都用张力计法。由于张力计测定的吸力范围为0~0.08 MPa, 因此, 它只能用来测定低吸力范围的水分特征曲线, 且精度较差。压力膜法其压力的测定范围为0~1.5 MPa, 基本上

收稿日期:2007-09-11; 修回日期:2008-03-19.

*基金项目:国家自然科学基金项目“种植业结构调整对黄土沟壑区农田水分生态效应的影响”(编号:50209016); 陕西省自然科学基金项目“黄土沟壑区种植业结构调整的水资源最优调控模式研究”(编号:2007E235)资助.

作者简介:宋孝玉(1971-), 女, 陕西安康人, 副教授, 博士, 主要从事农业水资源利用方面的教学与科研工作.

E-mail: songxy@xaut.edu.cn

可以测出完整的水分特征曲线。

实验室内测定土壤非饱和水力传导率的方法有:瞬时剖面法、单步出流试验法、垂直下渗通量法和垂直土柱稳定蒸发法等;这些方法都是建立在 Darcy 定律基础上的。

田间测定土壤非饱和水力传导率的常用方法有瞬时剖面法^[2,3]、Wind 蒸发法^[4]、壳方法^[5]、单步出流试验法^[6,7]和滴渗法^[8]等。它们的测定原理也是以 Darcy 定律为基础的。

实验室测定土壤水力性质的优点是简便、快速和精确,特别是试验过程是可控的。它的主要缺点是耗时、花费高和工作量大等,特别是当土壤的空间变异性很强且区域范围较大时,再用直接方法来确定土壤的水力性质是不可行的,甚至是不可能的。所以,近 20 多年来,用间接方法来估计土壤的水力性质越来越受到人们的重视。

1.2 间接估计方法

间接估计土壤水力性质的方法主要包括:标定理论、随机理论、分形理论、土壤转换函数、统计方法等。

1.2.1 标定理论

20 世纪 70 年代国际学术界提出空间异质性以来^[9],国内外开展了大量关于土壤特性异质性的研究。最初用于处理土壤特性空间异质性的方法是标定理论,标定理论基于相似定律和无因次化基础发展起来。在土壤水分运动参数变异性研究中,所谓标定,是将空间变异的土壤水基质势 ψ 和土壤体积含水率 θ 的关系以及土壤非饱和导水率 K 和土壤体积含水率 θ 的关系即 ψ - θ 和 K - θ 关系,通过对每一点选取适当的标定系数 α (标定因子或比例系数),将其标定为对各点均适用的统一的 $\bar{\psi}$ - θ 、 \bar{K} - θ 关系,即以统一的 $\bar{\psi}$ - θ 、 \bar{K} - θ 关系和随各点变化的标定系数 α 代替各点均不相同的 ψ - θ 和 K - θ 关系。其基本关系^[10]:

$$\alpha_i \psi_i = \bar{\psi} \quad (1)$$

$$K_i(\theta)/\alpha_i^2 = \bar{K} \quad (2)$$

式中: $\bar{\psi}$ 、 \bar{K} 分别为基质势、导水率的标定值; α_i 为标定系数; ψ_i 、 $K_i(\theta)$ 为第 i 点的基质势和导水率。

标定理论的基础是多孔介质流体动力学相似介质理论,即田间任意两点土壤几何相似、状态相似和动力相似。田间土壤由于粒经组成、孔隙率及孔隙在空间上的不均匀分布,致使土壤水分运动参数呈现明显的空间变异性。通过标定,用标定因子反映各点处土壤微观特征长度变化情况,可以处理田间

土壤特性的空间变异,简化分析研究工作。对每一点确定适当的标定系数 α_i ,由统计学方法计算出 α_i 的统计特征,通过其统计特征和空间相关结构来描述田间的变异情况。

一般田间尺度的土壤可以近似为几何相似,而在更大尺度就不再遵循几何相似,所以标定理论只适合田间尺度。

1.2.2 随机理论

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

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = C^* \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial \left[K_{ij}^* \frac{\partial (H+z)}{\partial x_i} \right]}{\partial x_i} \quad (3)$$

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^* 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^[11,12]。

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,尤其是能得到与研究尺度相适应的水分运动参数;随机理论面临着样本的采样问题,而且解析解结构复杂,应用于实际问题有较大的难度;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。

1.2.3 分形理论

土壤水力特性参数是影响土壤理化性状的主要因素之一。研究土壤结构形态特征的一个重要原因就是准确量化土壤水力特性参数。近几十年来,国际上关于土壤水分特性研究取得了可喜的进展,提出了一系列描述土壤水力特性参数的经验、半经验模型,但这些研究是在欧氏几何空间中描述土壤水力特性的。由于土壤结构性状的复杂性,基于欧氏空间的研究具有明显的不足,自 20 世纪 80 年代以来,应用分形理论对与土壤结构形态紧密相关的水力特性进行描述是该领域研究的一个重要方向,国内外学者对此作了许多尝试性的工作。

目前,从分形角度研究土壤水力性质的分形模型主要有 3 种类型:第一类为孔隙分形模型,即认为土壤孔隙体积在空间上的分布具有分形特征,以 Sierpinski 毯为基础构建而成;第二类为质量分形模型,即认为土壤聚合体的质量(或粒径)分布具有分形特征,而且质量分维 D_m 、孔隙体积分维 D_p 和孔隙表面分维 D_s 值相等,以 Menger 海绵为基础构建而

成;第三类为表面分形模型,即认为孔隙表面起伏分布具有自相似的嵌套结构。

分形维数赋予了非饱和土壤水分运动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^[13-15]。分形模型尚未考虑土壤颗粒表面化学性质、流体等的影响^[16]和尺度方面的扩展。有关土壤水分运动参数的分形模型的理论和在尺度方面的应用有待于进一步研究。

1.2.4 土壤转换函数

土壤转换函数是利用容易获得的土壤理化参数估算土壤水分运动参数的一种方法,有时也称为土壤传递函数。一般根据土壤类型,对 $\psi-\theta$ 和 $K-\theta$ 关系经验模型的参数给出经验值,或建立这些模型参数与土壤质地的关系式^[17-20]。由于土壤水动力学特征参数本质上是由土壤质地决定的,因此土壤转换函数具有一定的合理性。

由于区域土壤理化性质的差异,而且土壤质地、有机质、容重、矿物质等因子对空间变异的影响也不一致,因此土壤转换函数的形式较多,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^[21-23]。

目前,人们提出了构建土壤转换函数的方法主要有^[24]:回归分析、人工神经网络、数据处理的分组方法、分类与回归树方法。在尺度研究上,应用土壤转换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。

1.2.5 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。土壤水分运动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)与空间相关结构进行描述,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^[25,26]。这些年来,统计方法在土壤水分运动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,则测定的土壤水分运动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,得到土壤水分运动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^[27]对国内外的试验研究进行了总结,结果表明大多数土壤水动力参数特征符合对数正态分布和正态分布。

统计方法要对实测值进行统计分析,而土壤水分运动参数在尺度上的测试很困难,所以统计方法的作用受到限制。若将统计方法与标定理论、分形方法、随机理论和土壤转换函数相结合,发挥其优势,才能在更大尺度上反映土壤水分运动特征参数空间变异的特征。

2 主要进展

2.1 模型的研究

土壤作为陆地水文循环的重要界面,其水分运动特征参数空间异质性是流域径流形成机理最为重要的影响因素。目前,无论从实验上和计算上室内测定土壤水分动力学参数的方法已比较完善,在一定程度上能满足室内模拟的需要,而由于土壤本身的空间变异性,以及土壤和水分相互作用使室内和田间测定参数的测量结果在田间很难使用。要比较正确估算田间土壤水分动力学参数,必须在土壤的物理模型上进行改进,不仅考虑土壤的质地、容重、有机质含量,同时要考虑土壤的可塑性、空间变异性,以及土壤、水和空气相互作用的关系,并应用现有的数学推算方法进行模拟。

自20世纪70年代以来国内外已就土壤特性的空间变异问题进行一系列的研究,得出了一些极有价值的结论。黄冠华等^[28]应用随机场理论与地质统计理论对饱和水力传导度 K_s 和孔隙大小分布参数 α 的空间变异特征及空间估值进行了研究,同时根据分析结果对取样点数目的合理性作了评价。刘建国等^[29]考虑了土壤孔隙大小及孔隙通道曲折程度等对土壤水力特性的影响的分形模型对土壤水分运动参数进行了预测,为土壤水力参数的选取和确定开辟了新的途径。王盛萍等^[30]分析土壤水分运动参数的理论、取样方法及影响因素;贾宏伟等^[31]对土壤水分运动参数空间变异性的研究方法进行了分析。

在参数空间变异性模型研究中,一条思路是追求模型的适用性和拟合精度^[32,33],从Gardner模型到Campbell再到Van Genuchten模型,模型参数越来越多,模型形式也越来越复杂,但适用范围越来越广,拟合效果也越来越好。另一条思路是试图建立机理性的土壤水分运动参数模型^[34-36],从最初的Gardner模型、Campbell模型等经验模型到物理经验模型——A&P模型再到现在的分形模型,试图由土壤结构、孔隙组成分布等特征来建立机理性模型。机理性模型的建立是当前研究发展的必然趋势,对

整个土壤水分运动的研究具有重要的基础理论意义。

2.2 空间尺度的研究

随着空间尺度的不同,影响土壤水分运动参数特征的因子会发生变化,而且参数本身的特征也不尽相同。因此,研究土壤水分运动参数的空间变异,首要的问题是对参数的空间尺度进行划分。根据目前研究状况和研究手段,将土壤水分运动参数空间变异的研究尺度划分为三类,即物理点尺度、田间尺度和区域尺度^[37]。

对土壤水分运动参数,以多孔介质物理点(质点)的概念为基础,建立了许多模型,如 Brooks-Corey 模型(1964), Gardner 模型(1970), Campbell 模型(1974), Van Genuchten 模型(1980), Hillel 模型(1980)等,这些模型研究多孔介质的物理点中水流的平均值,称之为点模型^[38]。点模型中,土壤水分运动参数主要根据室内外的试验测试,由实测数据对已建立起来的经验模型进行拟合。实践中,通常求解试验仪器测试尺度范围内水流的均值,因此研究尺度与仪器测试尺度相同,可称之为物理点尺度。值得注意的是,据薛绪掌等^[39]用 3 种盘径的负压入渗仪测定田间水分入渗的研究认为导水率的均值随测定尺度增加而减少,也就是说,试验仪器测定尺度的大小也影响物理点尺度上土壤水分运动参数的大小,因此有必要研究不同测试尺度对水分运动参数变异性的影响,从而规范测试仪器,以求得水分运动参数的通用性。物理点尺度的尺度大小一般不大于 1 m^2 ,参数精度要求比较高。

田间尺度的变异,实质上是不同物理点上水分运动参数的差异。田间水平上,地形、土壤质地、作物、耕作方式和种植模式等应该相同,影响变异的因子主要为田间土壤的微变异,即在相同土壤质地范围内的土壤结构、容重、有机质和各粒级土粒组成的变异。田间尺度上,各点参数数据的采集主要依靠实测,间接方法得到的数据本身造成的误差可能大于变异程度。田间尺度的尺度大小一般为 $100 \sim 10^6 \text{ m}^2$,精度要求较高。

区域尺度一般大于 10^6 m^2 ,地形、地势、土壤质地、作物、耕作方式和种植模式等不尽相同,随着尺度的增大,甚至气候条件也不相同。以上因子都可能影响土壤水分运动参数的空间变异,而且会随着区域的不同而起着不同的作用。由于区域面积很大,实测土壤水分参数根本不可能,一般由间接方法得到,相应区域尺度上的精度相对较低。

在分析“点”尺度土壤水分运动参数异质性时,土壤本身理化性质是决定性因素,在分析研究坡面尺度、流域尺度、区域尺度土壤水分运动特征参数空间异质性时,必须考虑地貌、土壤、植被、土地利用等宏量因素与微观尺度量的综合影响,GIS 可用于采集、管理、操作、分析、模拟和显示空间相关数据,在土壤水分运动参数异质性分析、预测方面的应用也必将得到进一步的发展。

3 存在的问题及展望

综观国内外的研究现状,研究土壤水分运动参数空间变异目前存在或有待解决的主要问题有:土壤水分运动参数的空间变异性的结果的标准化问题,由于不同方法可以得出不同的测定结果,如何衡量其测量的精确度;不同尺度土壤水分运动参数的相互转化问题,如何通过小尺度向大尺度的转化;理论模型中参数的变异系数问题,各种理论模型中都引用了一定的参数,这些参数反映一定的区域的土壤水分特征,其代表性高低如何衡量;不同土壤结构和组合影响着土壤水分运动参数,如何更好的反映其对土壤水分运动参数的影响等,都有待进一步的研究。

由于土壤本身的复杂性和空间变异性,使得土壤水分运动参数的变异性也更加复杂,还有大量的基础性的研究需要展开,尤其在区域尺度水平上,考虑的问题往往更复杂,必须考虑地貌、土壤、植被、土地利用等宏量因素与微观尺度量的综合影响,需要逐步深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Lei Zhidong, Hu Heping, Yang Shixiu. A review of soil water Research [J]. *Advances in Water Science*, 1999, 3(10):311-318. [雷志栋,胡和平,杨诗秀.土壤水科学研究进展与评述[J].水科学进展,1999,3(10):311-318.]
- [2] Rose C W, Stern W R, Drummond J E. Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil in situ [J]. *Australia Journal of Soil Research*, 1965, 3:1-9.
- [3] Watson K K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous material [J]. *Water Resources Research*, 1966, 2:709-715.
- [4] Wind G P. Capillary conductivity data estimated by a simple method [C] // Rijtema P E, Wessink H, ed. *Water in the unsaturated zone*. IASHGentbrugge/UNESCO Paris, 1968:181-191.
- [5] Bouma J, Belmans C, Dekker L W, et al. Assessing the suitability of soils with macropores for subsurface liquid waste disposal [J]. *Journal of Environment Quality*, 1983, 12:305-311.

- [6] Kool J B, Parker J C, van Genuchten M Th. Determining soil hydraulic properties for one-step outflow experiments by parameter estimation: I Theory and numerical studies[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49:1 348-1 354.
- [7] Parker J C, Kool J B, van Genuchten M Th. Determining soil hydraulic properties for one-step outflow experiments by parameter estimation: II Experimental studies[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49:1 354-1 359.
- [8] Dirken C. Unsaturated hydraulic conductivity [C] // Smith K A, Mullins C E. *Soil Analysis; Physical Methods*. New York; Marcel Dekker, 1991;209-269.
- [9] Carvollo HO. Spatial variability of in situ unsaturated hydraulic conductivity in Maddock sandy loam[J]. *Soil Science*, 1976, 121(1):1-8.
- [10] 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.
- [11] Huang Guanhua, Shen Rongkai. Study on stochastic model of large-scale unsaturated flow and analysis of its effective parameters [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, (11):39-48. [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.]
- [12] Mantoglou A. A theoretical approach for modeling unsaturated flow in spatially variable soil; Effective flow models in finite domains and nonsaturation [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(1):251-267.
- [13] Ross P J. Equation for extending water-retention curve to dryness [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55:923-927.
- [14] Crawford J W. The relationship between structure and the hydraulic conductivity of soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45:493-501.
- [15] De Gennes P G. Partial filling of a fractal structure by a wetting fluid [C] // Adler D, et al, eds. *Physics of Disordered Materials*. New York; Plenum Press, 1985:227-241.
- [16] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: II. Applications [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55:1 239-1 244.
- [17] Pape H. Interlayer conductivity of rocks—A fractal model of interface irregularities for calculating interlayer conductivity of natural porous mineral systems [J]. *Colloids and Surfaces*, 1987, 27:97-112.
- [18] Rawls W J, Brakensiek D L, Logsdon S D. Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57:1 193-1 197.
- [19] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle - size distributions: analysis and limitations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56:362-369.
- [20] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(4):987-996.
- [21] 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 Science Society of America Journal*, 1999, 63:510-519.
- [22] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S. Estimating generalized soil water characteristic from texture [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 5:1 031-1 036.
- [23] Ahuja L R, Naney J W, Williams R D. Estimating soil water characteristics from simpler properties or limited data [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49:1 100-1 105.
- [24] Zhan Weihua, Huang Guanhua. A review of study on fractals of soil hydraulic properties [J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(4):457-462. [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.]
- [25] Ghosh R K. Estimation of soil-moisture characteristics from mechanical properties of soils [J]. *Soil Science*, 1980, 130:60-63.
- [26] Schaap M G, Bouten W. Modeling water retention curves of sandy soils using neural networks [J]. *Water Resources Research*, 1996, 32:3 033-3 040.
- [27] Chan T P, Govindaraju R S. A stochastic model for determining soil hydraulic properties from particle size distribution [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2003, 121(26):284-293.
- [28] Huang Guanhua. A review of experimental study on spatial variability of soil hydraulic properties [J]. *Advances in Water Science*, 1999, 10(4):450-457. [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.]
- [29] Huang Guanhua, Xie Yonghua. Study on spatial variability and optimal estimation of unsaturated flow parameters [J]. *Advances in Water Science*, 1999, 10(2):101-106. [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]
- [30] Liu Jianguo, Nie Yongfeng. Fractal models for predicting unsaturated soil hydraulic parameters [J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(1):99-106. [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.]
- [31] Wang Shengping, Zhang Zhiqiang, Wu Jun, et al. Spatial heterogeneity of characteristic functional parameter of soil water movement: Mathematical approaches, sampling scheme, and influence factors [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(3):95-98. [王盛萍,张志强,武军,等.土壤水分运动参数空间异质性:理论分析、取样与影响因素[J].中国水土保持,2003,1(3):95-98.]
- [32] Jia Hongwei, Kang Shaozhong, Zhang Fucang. A review of study methods on spatial variability of soil hydraulic properties [J]. *Journal of Northwest Science-Technology University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2004, 32:97-102. [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,2004,32:97-102.]
- [33] Williams R D, Ahuja L R. Evaluation of similar-media scaling and a one-parameter model for estimating the soil water characteristic [J]. *European Journal of Soil Science*, 1992, 43(2):237-248.

- [34] Gregson K, Hector D J, McGowan M. A one-parameter model for the soil water characteristic[J]. *European Journal of Soil Science*, 1987, 38 (3):483-486.
- [35] Timlin D J, Williams R D, Ahuja L R, et al. Simple parametric methods to estimate soil water retention and hydraulic conductivity [J]. *Developments in Soil Science*, 2004, 30:71-93.
- [36] Poulsen T C, Moldrup P, Iversen B V, et al. Three-region Campbell model for unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2002, 66: 744-752.
- [37] Tjalfé G Poulsen, Per Moldrup, Anne Thorbjørn, et al. Predicting air permeability in undisturbed, subsurface sandy soils from air-filled porosity [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, 133(10): 995-1001.
- [38] Jia Hongwei. Experimental Study on Parameter Distributions of Soil Water Movement in Shiyang River Basin [D]. Yangling: Northwest Science-Technology University of Agriculture and Forestry, 2004. [贾宏伟. 石羊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.]
- [39] Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xie Senchuan. *Soil Water Dynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988:25-124. [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, 1988:25-124.]
- [40] Xue Xuzhang, Zhang Renduo, Gui Shengxiang. Effect of measurement scales on measured soil hydraulic properties and their spatial variability [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(3):47-51. [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.]

Progress and Perspective of Spatial Variability Study on Unsaturated Soil Water Movement Parameters

SONG Xiaoyu, LI Yajuan, JIANG Jun, MA Yuxia

(Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Spatial characteristics of unsaturated soil water movement parameter are the base and precondition of scientific understanding soil moisture dynamic variation of large-scale. On the basis of great deal of the domestic and overseas reference, the progress of spatial variability study on unsaturated soil water movement parameter have been analyzed and reviewed from the model to spatial scale research, pointed that mechanism model research was the direction of spatial variability study on unsaturated soil water movement parameter, and the precision of scale research was inadequate. After analyzed and concluded the methods of spatial variability study on unsaturated soil water movement parameter, indicated that included direct and indirect method, the advantage and disadvantage of which have been summarized. In the end, the problem of spatial variability study on unsaturated soil water movement parameter have been discussed which mostly focused on the standardization of results of spatial variability study on unsaturated soil water movement parameter and inter-transformation of unsaturated soil water movement parameter on the different scale, which is the direction for the further research.

Key words: Soil water movement parameter; Spatial variability; Research method; Perspective.