

# 数值反演方法在确定土壤水力性质中的研究进展

张俊 徐绍辉

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

**摘要** 数值反演方法是间接确定土壤水力性质的方法之一。本文介绍了数值反演法在确定土壤水力性质方面的特点,阐述了该方法的基本原理以及它在确定土壤水力性质中的研究现状,并对其未来发展做了展望。

**关键词** 土壤水力性质; 间接方法; 数值反演法

**中图分类号** S152.7

随着社会经济的发展和现代工业化程度的提高,土壤和水资源的保护越来越受到人们的关注。许多有害物质通过各种途径进入土壤,不仅污染土壤,而且随水迁移污染地下水。为了定量描述水和污染物在土壤中的运移,人们往往借助于数学模型。而确定土壤水力性质是模拟田间水流和溶质运移过程的先决条件。土壤水力性质是指土壤水分含量与压力水头以及土壤水力传导率与土壤水分含量或压力水头之间的构成关系。它可以用水分持留函数  $q(h)$  和水力传导率函数  $K(h)$  表示<sup>[1]</sup>。土壤水力性质的确定方法分为直接法和间接法两大类。由于直接方法或需要严格的初边值条件或需要较精密的仪器,所以具有花费高和工作量大等特点,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,用间接方法来估计土壤的水力性质越来越引起人们的兴趣。数值反演法是间接方法的一种。近 20 多年来,数值反演法由于具有:(1)不需要精密仪器;(2)没有严格的初始条件和边界条件;(3)灵活的实验设计;(4)能够对优化参数提供置信区间等特点而受到人们的关注。

## 1 数值反演法的基本思想及构建过程

数值反演法在估计土壤水力性质时,首先假定水分持留函数  $q(h)$  和水力传导率函数  $K(h)$  可以近似地用含有有限个未知参数的解析式来表达,给这些参数一初值,然后把赋予了初值的  $q(h)$  和  $K(h)$  代入表征瞬时流的方程,并联合实验可控制的初始

条件和边界条件,形成一完整描述出流状况的数学模型。然后求解该数学模型,用出流方程的解计算出流量,并与实验观测值对比。再改进参数,重复上述步骤,直到模拟值与实测值之间的误差达到最小,此时的参数值便是最优化的。从而也就确定了  $q(h)$  和  $K(h)$ 。

求解过程包含两个主要步骤,一是求解出流方程,二是调整参数即优化。

出流过程可以用 Richards 方程来描述,在一维垂直流的情况下,如坐标向下为正,则可表示为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [k(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right)] \quad (1)$$

式中  $q$  是体积含水量 ( $L^3/L^3$ ),  $h$  是压力水头 ( $L$ ),  $K(h)$  是土壤水力传导率 ( $L/T$ ),  $z$  是垂直坐标 ( $L$ ),  $t$  指时间 ( $T$ )。其初始和边界条件为:

$$h = h_0(z) \quad t = 0 \quad 0 \leq z \leq L$$

$$\partial h / \partial z = 1 \quad t > 0 \quad z = 0$$

$$h = h_L - h_a \quad t > 0 \quad z = L$$

$z = 0$  表示土柱的顶端,  $L$  是土柱的长度包括陶瓷盘的长度 ( $L$ ),  $h_0$  是初始压力水头 ( $L$ ),  $h_L$  是陶瓷盘底部的压力水头 ( $L$ ),  $h_a$  是所施加的气压 ( $L$ )。

(1) 式可以通过有限元法<sup>[2]</sup>或有限差分法<sup>[3]</sup>求解。

对于土壤水力函数一般用 van Genuchten 模型来表示:

$$S_e = (q - q_r) / (q_s - q_r)$$

$$S_e = (1 + |ah|^n)^{-m} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2$$

$S_e$  是饱和度,  $a$  ( $1/L$ ),  $n$  和  $l$  是经验参数,  $q_r$ ,  $q_s$  分别是剩余和饱和体积含水量 ( $L^3/L^3$ ),  $K_s$  是饱和水力传率 ( $L/T$ ),  $m=1-1/n$

优化的参数值即参数矢量  $b$  是通过最小化目标函数  $OF(b)$  来获得的。  $OF(b)$  用下式来表达:

$$OF(b) = (e^T/V) \cdot e \quad (3)$$

其中  $V$  是测定的出流变量矢量。  $e$  表示观察误差,  $e=V_m-V_s$ ,  $V_m$ ,  $V_s$  分别表示出流量的测定值和模拟值,  $T$  表示转置。目标函数  $OF(b)$  是参数矢量  $b$  的非线性函数, 近年来已经有很多方法使目标函数最小化, 如最速下降法 (steepest descent method), 牛顿法 (Newton's method), 高斯法 (Gauss method), LM 法 (Levenberg-Marquardt method), 全局优化法 (methods of global optimization) 等。其中 LM 法在水力学中作为一种求非线性最小平方拟合的标准方法而被普遍使用<sup>[4]</sup>。

## 2 数值反演法在确定土壤水力性质的研究现状

Whisler 和 Wastson 首次提出应用计算机模型来估计土壤水力传率, 他们通过匹配观测值和模拟值估计了土壤的饱和水力传率<sup>[5]</sup>。 Gardner 首次提出用压力盘出流数据来计算传率和扩散度<sup>[6]</sup>。在此基础上, Doering<sup>[7]</sup> 通过提出单步出流实验的方法改进了压力盘出流法, 既节省了实验时间又没有减低精度。所谓单步出流是指出流实验中使压力一次性增加到某个较大值, 以“排出”土样中的水分。但是这些方法都是基于达西定律用解析方法求解, 所以要求严格的初边值条件。

在数值研究中, Zachmann<sup>[8]</sup> 首次对用反演法确定土壤非饱和流参数进行了初步研究, 认为这种方法可以通过参数估计来同时确定土壤水分滞留特征和水力传率。对于反演法在土壤非饱和流中的应用他只做了数值实验来说明其可行性, 并没有进行实验检验。所以他进一步指出以后的可能研究方向, 如目标函数的选择, 水力性质函数形式的验证等。

Kool 和 Parker 等把反演法应用于单步出流实验, 并从理论和实验上做了较详细的探讨, 使得反演法得到更多的认可<sup>[9,10]</sup>。在理论研究中, 他们分析

了参数求解的唯一性问题和实验误差对解的影响, 指出如果所设计的试验能覆盖一个宽范围的水分含量, 出流实验中误差足够小, 初始值接近真实值, 那么唯一性问题将被最小化。在实验研究中 Parker 根据目标函数包含的不同信息比较了 3 种不同方法在脱湿过程中对实验结果的影响, 认为瞬时出流数据 (最后累积出流量) 比平衡滞留数据 ( $h$ ) 更适合水力性质的估计。随后 Kool 和 Parker<sup>[11]</sup> 从参数的敏感性、数据误差和模型误差影响等方面对瞬时流中的反演问题进行了比较全面的分析, 这对于实验设计、参数和模型的选择、以及预测值的准确性提供了理论支持。与此同时, Russo<sup>[12]</sup> 研究了土壤水力函数的参数形式对单步出流优化的影响, 并比较了 Mualem-van Genuchten (MV)<sup>[13]</sup>, Brooks 和 Corey<sup>[14]</sup>, 及 Gardner-Russo<sup>[12]</sup> 等土壤水力模型, 认为 MV 模型有较好的适应性。

Toorman, Van Dam, Eching, Vereecken 等<sup>[15-20]</sup> 围绕着解的唯一性、稳定性、参数的敏感性等问题对用数值反演法推求土壤水力性质做了进一步的探讨。Toorman 等<sup>[15]</sup> 从目标函数的角度评价了反演法的问题。在目标函数中他们使用了出流量、水分含量、基模势的不同组合作为辅助变量, 结果表明如果在目标函数中包含有基模势的值, 参数估计的敏感性将会得到很大改善并且这一过程将有助于确定需要测定哪个辅助变量。Van Dam<sup>[16]</sup> 通过实验得出仅采用累计出流量  $Q(t)$  本身容易导致解的非唯一性的结论, 而补充  $q(h)$  就可以得到可靠的参数解, 同时他还讨论了单步出流实验存在的问题。Eching 等<sup>[17]</sup> 把 Toorman<sup>[15]</sup> 的理论分析应用到单步和多步出流实验中, 认为加入同时测定的土壤压力水头数据可以减少参数的非唯一性, 而且节省了实验时间。Van Dam 等<sup>[18]</sup> 评价了单步出流实验的缺点, 在多步出流实验中应用了数值反演方法。与单步出流相比, 多步出流是指在实验中分几次向土样中加压, 每次加压都比较小, 即逐步加压。结果表明多步出流不论在理论上还是在实践上都优于单步出流实验, 因为多步出流实验中包含了更多的信息以唯一确定水力性质中的参数。Eching 等<sup>[19]</sup> 在多步出流实验中加入自动测定的土壤压力水头数据, 也表明了测定值与模拟值之间极好的吻合。Vereecken 等<sup>[20]</sup> 用多步出流实验比较了不同参数矢量对确定水力性质的影响, 同时也研究了在不同压力步长的目标函数中使用水分含量对确定水分滞留函数的作用, 结果说明饱和水力传率  $K_s$  和 MV 模型中的参数  $l$  应该作为

拟合参数并且在目标函数中引入额外信息将提高估计效果。Abbaspour 等<sup>[21]</sup>通过溶度计实验分析了使用不同变量组合对参数估计的影响,并使用了新的基于乘函数(multiplicative function)的目标函数来估计参数,发现这种目标函数优于传统的平方和目标函数。在他们的研究中还提出了参数条件的概念,认为参数条件(parameter conditioning)比参数拟合(parameter fitting)更适合于环境研究。Vrugt 等<sup>[22]</sup>在多步出流实验中使用了基于信息定位的参数识别方法(Parameter Identification Method based on the Localization of Information),即利用不同参数对模型敏感性的不同变化把测量的总集合分成独立的子集,每个子集中包含有相应的模型参数的最多信息。结果表明基于信息定位的参数确定法不仅解决了参数的唯一性问题,还能促进对唯一性问题的理解。

Feddes 等、Ciollaro 和 Romano、Santini 等、imunek 等<sup>[23-26]</sup>成功地把数值反演法应用于蒸发实验中。Feddes 等<sup>[23]</sup>比较了使用反演法和 Wind 法<sup>[27]</sup>从蒸发实验中确定水力传导率。作为土壤水力性质空间变异研究的一部分,Ciollaro 和 Romano<sup>[24]</sup>使用了反演法来确定大量土样的土壤水力参数。Santini 等<sup>[25]</sup>也在蒸发实验中应用反演法,通过比较实验室测定的饱和水力传导率和土壤水分滞留数据,认为该方法具有良好的可行性和准确性。imunek 等<sup>[26]</sup>分析了用蒸发方法来确定土壤水力性质的特点,结果发现水力传导率函数和水分特征曲线之间有着极好的一致性。

尽管实验室的测定具有快速准确的特点,但实验室确定的土壤水力性质并不能代表田间情况。Dane 和 Hruska<sup>[28]</sup>首次应用田间数据于反演法,在他们的实验中 van Genuchten 的水力函数模型参数通过瞬时出流数据得到优化,从实验中他们得出结论,优化参数的敏感性依赖于使用的边界条件。Kool 和 Parker<sup>[29]</sup>讨论了反演法在田间的应用。Russo 等<sup>[30]</sup>从出流实验估计了土壤水力性质。Nunzio romano<sup>[31]</sup>用张力计和中子仪分别测得的田间土水势和土壤水分含量数据作为输入数据的方法来估计土壤水力函数,并用地统计分析描述了水力函数的空间变异性。通过该方法与 Sisson 等<sup>[32]</sup>提出的简化方法比较认为简化方法只能粗略地估计水力传导率。在他的实验中也讨论了减少实验测量值的可行性。imunek, J. 和 van Genuchten<sup>[33, 34]</sup>应用了田间测定的张力盘入渗数据于三维 Richards 方程中求解非饱和水力函数,认为仅有入渗数据在三维出流方程中并不能保

证解的唯一性,需要额外的信息如同时测定的压力头,水分含量数据,才能获得满意结果。随后,他们简要讨论了结合数值反演 Richards 方程求解土壤水力函数的田间方法<sup>[35]</sup>。Francois Lehmann<sup>[36]</sup>等用田间数据讨论了一维非饱和流中的参数校准问题,指出优化过程要获得可靠结果所要具备的条件。

### 3 结论与展望

近 20 年来,土壤水力性质的定量化研究,特别是用间接方法估计土壤水力性质受到了土壤物理、陆地生态、水文、环境工程等学科领域的科学家们的广泛关注。特别是在大尺度范围内快速、准确地测定土壤的水力性质越来越成为土壤水运动研究所需。直接测定土壤水力性质不仅需要精密仪器,严格的初边值条件,而且耗时,烦琐。随着计算机性能的迅速提高,及我们对土壤化学和物理过程基础研究的深入,计算机在建模方面的应用可望越来越深入。数值反演方法因具有快速、简便的特点而受到人们的注意,结合数值反演法的实验方法不断在改进,以获得可靠解。如多步出流实验,蒸发实验,张力计入渗实验等。但是数值反演方法的计算强度很大,要求具备有效的优化计算方法和参数敏感性分析。而在实际应用中,由于解的非唯一性和非稳定性,使得数值反演方法未能成为一种标准的方法而被人们所广泛接受。所以需要进一步研究利用数值反演方法确定土壤水力性质时的唯一性、稳定性问题,以分析解是“良态”的还是“病态”的,同时还应该注意可靠的优化方法的研究。近年来,研究者对反演法进行了改进,如增加输入信息、减少数据误差等以期获得唯一解。此外,还要进一步研究反演法在田间的应用,因为实验室获得的土壤水力性质并不能完全代表田间的实际情况。

### 参考文献

- 1 华孟,王坚. 土壤物理学. 北京:北京农业大学出版社, 1993, 61~105
- 2 薛禹群,谢春红. 水文地质学的数值法. 北京:煤炭工业出版社, 1980, 102~207
- 3 陆金甫,关治. 偏微分方程数值解法. 北京:清华大学出版社, 1987, 145~217
- 4 van Genuchten MT, Leij FJ, Wu L. Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media: Part 1. the university of California, Riverside, CA92521, USA, 1999, 651~652

- 5 Whisler FD and Watson KK. One-dimensional gravity drainage of uniform columns of porous materials. *J. Hydrol.*, 1968, 6: 277~296
- 6 Gardner WR. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1956, 20: 317~320
- 7 Doering EJ. Soil water diffusivity by the one-step method. *Soil Sci.*, 1965, 99: 322~326
- 8 Zachmann DW, Duchateau PC and Klute A. Simultaneous Approximation of Water Capacity and Soil Hydraulic Conductivity by Parameter Identification. *Soil Sci.*, 1982, 134: 157~163
- 9 Kool JB, Parker JC and van Genuchten MT. Determining soil hydraulic properties for one-step outflow experiments by parameter estimation. Theory and numerical studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 1348~1354
- 10 Parker JC, Kool JB and van Genuchten MT. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation. Experimental studies. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 1354~1359
- 11 Kool JB and Parker JC. Analysis of the Inverse Problem for Transient Unsaturated Flow. *Water Resour. Res.*, 1988, 24 (6): 817~830
- 12 Russo D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 1988, 24: 453~459
- 13 Van Genuchten MT. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44: 892~898
- 14 Brooks RH and Corey AT. Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 1966, 92: 61~88
- 15 Toorman AF, Wierenga PJ and Hills RG. Parameter estimation of soil hydraulic properties from one-step outflow data. *Water Resour. Res.*, 1992, 28: 3021~3028
- 16 Van Dam JC, Stricker JNM and Droogers P. Evaluation of the Inverse Method for Determining Soil Hydraulic Functions From One-step Outflow Experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 1042~1050
- 17 Eching SO and Hopmans JW. Optimization of hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure data. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1993a, 57(5): 1167~1175
- 18 Van Dam JC, Stricker JNM and Droogers P. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 647~652
- 19 Eching SO, Hopmans JW and Wendroth O. Unsaturated soil hydraulic conductivity from transient multi-step outflow and soil water pressure data. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 687~695
- 20 Vereecken H, Kaiser R, Dust M and Putz T. Evaluation of the multistep outflow method for the determination of unsaturated hydraulic properties of soils. *Soil Sci.*, 1997, 162: 618~631
- 21 Abbaspour SR and van Genuchten MT. SUFI: an inverse approach for conditional parameter estimation. In: Van Genuchten M Th, Leij FJ and Wu L eds. *Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Proc. Int. Workshop, University of California, Riverside, CA, 1999, 705~712*
- 22 Vrugt JA, Bouten W and Weerts AH. Information content of data for identifying soil hydraulic parameters from outflow experiments. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 19~27
- 23 Feddes RA, Kabat P, van Bakel PJT, Bronswijk J J B and Halbertama J. Modeling soil water dynamics in the unsaturated zone –state of the art. *J. Hydrol.*, 1988, 100: 69~111
- 24 Ciollaro G and Romano N. Spatial variability of the soil hydraulic properties of a volcanic soil. *Geoderma*, 1995, 65: 263~282
- 25 Santini A, Romano N, Ciollaro G and Comegna V. Evaluation of a laboratory inverse method for determining unsaturated hydraulic properties of a soil under different tillage practices. *Soil Sci.*, 1995, 160: 340~351
- 26 Imùnek J, Wendroth O and van Genuchten MT. A parameter analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62 (4): 894~905
- 27 Wind GP. Capillary conductivity data by a simple method. In: Rijtema PE and Wassink H, ed. *Water in the unsaturated zone. Proc. Wageningen Symp. June 1966, IASAH, Gentbrugge, 1968, 1: 181~191*
- 28 Dane JH and Hruska S. In-situ determination of soil hydraulic properties during drainage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1983, 47: 619~624
- 29 Kool JB, Parker JC and van Genuchten MT. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models - A

- review. J., Hydrol, 1987, 91: 255~293
- 30 Russo D, Bresler E, Shani U and Parker JC. Analysis of infiltration events in relation to determining soil hydraulic properties by inverse problem methodology. Water Resour. Res., 1991, 27: 1361~1373
- 31 Nunzio romano. Use of an inverse method and geostatistics to estimate soil hydraulic conductivity for spatial variability analysis. Geoderma., 1993, 60: 169~186
- 32 Sisson JB, Ferguson AH and van Genuchten MT. Simple method for predicting drainage from field plots. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 1147~1152
- 33 imùnek J. and van Genuchten MT. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. Water Resour. Res., 1996, 9: 2683~2696
- 34 imùnek J, and van Genuchten MT. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from mutiple tension disc infiltrometer date. Soil Sci., 1997, 162: 383~398
- 35 imùnek J, van Genuchten MT, Molly M Gribb, Hopmans JW. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. Soil & Tillage Research, 1998, 47: 27~36
- 36 Francois Lehmann and Philippe Ackerer. Determining soil hydraulic properties by inverse method in one-dimensional unsaturated flow. J. Environ. Qual., 1997, 26: 76~81

## ADVANCES IN STUDY ON INVERSE METHOD TO DETERMINE SOIL HYDRAULIC PROPERTIES

Zhang Jun    Xu Shaohui

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

**Abstract** The numerical inverse method is an indirect method to determine soil hydraulic properties. In this paper, the author introduces characteristics, elaborates basic principles, reviews status of the research and looks into the future of the method.

**Key words** Soil hydraulic property, Indirect method, Numerical inverse method

\*\*\*\*\*

(上接第 197 页)

## A REVIEW OF STUDIES ON QUANTITATIVE CHANGE IN CULTIVATED LAND IN CHINA

Liu Yihua

(Dept. Of geography, Guangzhou University, Guangzhou 510405)

**Abstract** Ours is a big agricultural country with such a large population, but limited land resources and the conflict between the two has been growing more and more prominent. How to exploit the land resources in a reasonable, effective and sustainable way is extremely important in tackling with the problem. Since 1949, a great many scholars have been doing profound research on land resources in China, The study on quantitative change in cultivated land is an important aspect of the recent research on land resources. This paper reviews and summarizes main progresses in the study on quantitative change in cultivated land and points out some problems still existing in the study and possible solutions.

**Key words** Quantitative change, Cultivated land, Sustainable development, LUCC