

土壤水分研究现状与进展*

尹光彩 周国逸 黄志宏

(中国科学院华南植物研究所 广州 510650)

摘要: 本文从土壤水分物理参数的确定、土壤水分动力学、土壤水分能量研究、土壤—植物—大气连续体中水流的运动、土壤水分测试技术等几个方面,综述了国内外土壤水分研究现状与进展,并指出,80年代以来,我国土壤水分研究在理论、方法和手段方面都逐步与国际趋同,但我国森林土壤水分研究方面的工作进行得很少。最后,展望了今后土壤水分研究工作的发展趋势和方向。

关键词: 土壤水分运动;土壤水分参数;森林土壤水分

Progress in Research on Soil Moisture

YIN Guang-Cai ZHOU Guo-Yi HUANG Zhi-Hong

(*South China Institute of Botany, Chinese Academy
of Sciences, Guangzhou, 510650, China*)

Abstract: A review about the progress of research on soil moisture inland and abroad was presented in this paper, which was mainly focused on the calculating methods of hydraulic parameters of Soil moisture, the dynamics of soil moisture, the energy research of soil moisture, the water transfer of the soil-vegetation-atmosphere continuum and the development of new technologies to measure Soil moisture etc. Since 1980s, there existed a same tendency in the research of soil moisture inland and abroad, either in theory or in method development. But the research on forest soil moisture lagged behind relatively in land, and much attention should be paid on the research of forest soils.

Keywords: Dynamics of soil moisture; Hydraulic parameters of soil moisture; Forest soil moisture

土壤的形成过程包括物理过程、化学过程和生物过程。由于不同地区在气候、母岩、地形、植被和动物等方面的不同,形成了各种土壤类型,导致土壤性质存在明显差异。即使是同一土壤类型,不同的时间和空间上土壤的某些性质仍然不同。这表明土壤具有时间上和空间上变化的特点^[1]。土壤的水势、土壤含水量、土壤毛管持水量、田间持水量、导水率、径流系数、土壤有效水分、土壤保水系数等是重要的土壤水分参数。在森林土壤中,这些因子的空间变化与养分一样,影响着树木的根系吸水,进而影响林木的生长。研究这些因子的空间异质性,对深入了解树木根系的结构、变异规律和生长具有十分重要的意义。

土壤水分在陆地表面、大气、河流和含水层之间的物质和能量转化方面起着决定性的

* 网络项目资助。

作用^[2]。实际上,土壤水分的时空分布是农业科学、森林生态学、气象水文学、工程学、水资源和生态系统模型等研究领域的一个重要组成部分^[3]。

森林土壤水分蓄库不仅为植物生长提供必要的水分来源,而且是森林生态系统物质循环的载体。土壤内水分是植物赖以生存的主要条件之一,壤中流是水分在土壤中的再分配与水分循环的一个重要环节,对整个流域径流产生及洪水预报、流域水文循环的计算都具有相当重要的作用。

1 国内土壤水分研究的现状与进展

土壤水分是土壤物理学的一个重要分支。早期我国的土壤水分研究只有少量的零星工作,且大都局限于探讨土壤含水量对作物或树苗生长、产量的影响等^[4]。自70年代末期能量概念引入国内后,人们开始用定量的连续的能量观点代替以定性为主的间断的形态学观点来研究土壤水分^[5];用势能来解释土壤中水分的保持;用水分特征曲线来表示土壤水蕴有的能量水平即水势(或吸力)的大小与土壤含水量之间的函数关系;认为土壤中任何两点之间的水势差,才是土壤水分运动的驱动力,表示为 $-\frac{d\Psi}{dx}$,即水分总是从势能高处向势能低处运动^[6]。随后,SPAC理论在80年代初被介绍到国内,它把土壤—植物—大气看作是一个连续体系,水在该系统中运转传输,就像链环一样相互衔接,并可用统一的能量指标——水势来表示各部位甚至不同介质之间能量水平的变化和相互关系^[7]。80年代开始对土壤水分的空间异质性进行研究^[8],并运用经典的统计分析方法来对所测得的某些参数进行标定^[9]。

1.1 土壤水物理参数的测定及其相互关系的研究

各种水分常数是土壤的基本物理参数,80年代以来成为研究的热点^[10,11],并借助国外的一些经典模型来进行计算,如:邵明安等^[12]提出了根据土壤水分特征曲线推求土壤导水参数的方法。陈效民等^[13]介绍了应用一次出流法结合SFIT模型来测定土壤水分特征曲线和水力传导曲线的方法。张光辉等^[14]以Brooks和Corey持水模型条件下的Van Genuchten导水模型为基础,首次用土壤物理特性推导出Green-Ampt模型中的土壤水吸力参数 S_f 的计算公式。

1.2 土壤持水性研究

土壤的持水特性受土壤的物理特征影响很大,研究表明^[15,16]:土壤物理粘粒(<0.01mm)含量或容重、孔隙度等与最大吸湿量或田间持水量之间存在一定的相关关系;还有研究表明^[17]:土壤持水性能主要取决于土壤质地,也受结构和有机质的影响。

1.3 土壤水分运动研究

土壤水分运动及其影响因子的研究一直受到高度的重视,研究的重点是非饱和土壤水的运动,而更多的是一维运动,特别是蒸发问题^[18,19]。80年代以后,数值模拟在土壤水分运动研究中被广泛运用,如:非饱和土壤水一维流动数值计算^[20]。1985年进一步提出使用FORTRAN语言的一维非饱和流通用程序^[21],该程序可用来计算土壤水分入渗、蒸发和水分再分配过程等。后来,非饱和土壤二维流的数值计算方面也有相应的工作,如:渗灌条件下二维流数学模型的建立^[22]等。上述各项计算结果大都与试验结果有较好的一致性。裴铁藩等^[23]建立了森林土壤渗透系数的数学模型。李金中等^[24]用回归分析法分别

建立了森林流域土壤饱和渗透系数和有效孔隙度随深度变化的数学模型。近年来不少学者提出了土壤水动力学参数的推求方法^[25~28]。

1.4 土壤水分能量研究

1979年,朱祖祥提出了土壤水分能量的概念^[5],后来土壤水分能量的研究主要表现在对土壤热力学性质的研究,如:白锦麟,张一平等^[29]对几种土壤吸附气态水的特性及其热力学函数进行了研究;也有不少人土壤的水势温度效应进行了研究^[30~32]。

1.5 土壤水分的时空异质性研究

我国很多学者对农田^[8,33,34]和人工草地^[35]土壤水分物理性质的时空变异规律及其变异原因进行了研究,在研究方法上将分形理论和地统计学原理相结合,定量地分析了土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征^[36]。邱扬,傅伯杰等^[37]采用 DCCA (除趋势典范对应分析) 排序,定量研究了黄土丘陵小流域尺度上土壤水分的时空分异类型及与环境因子的关系。研究表明,土地利用对土壤水分的垂直分布影响最为显著,地貌类型、坡度、坡位与海拔高度的影响次之,而坡向和坡形的影响较小。坡度、海拔高度、坡向和坡位对土壤水分季节变化影响显著,而地貌类型、坡形和土地利用的影响相对较弱。

1.6 土壤—植被—大气连续体中水分平衡的研究

陈志雄^[38]研究了农田水分平衡。后来进一步通过根层边界水分通量来研究土壤和作物之间的水分平衡^[39]。朱自玺等^[40]分析了麦田水分平衡的动态。李洪文等^[41]通过对山西寿阳县年降雨量、气温和蒸散量的分析,建立了保护性耕作土壤水分模型及其相关子模型。冯广龙等^[42]对土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系进行了模拟研究。

1.7 测试技术研究

目前国内测定土壤水势的方法和仪器已日趋完善,张力计、电阻块和中子仪已进入商业生产。吉林农科院用石膏块法监测土壤含水量(或土壤水势)颇有成效。北京农业大学研制的石膏块及土壤水分仪,测定范围达 -1.5MPa ^[43]。

综上所述,我国的土壤水分研究主要集中在黄土丘陵区水土流失严重的地区,以及农田土壤水分的研究方面,由于森林土壤水分时空差异大,林内地形复杂,植被的根系错综复杂,测试手段受到限制,因此,这方面的研究进行得很少,而且,大都是一些资料性的报道,水分研究尚以形态研究为主,土壤水能态概念的应用刚刚起步,测试手段落后,研究区域主要是寒温带和温带水分比较缺乏的地区^[44~50]。南亚热带和热带地区的土壤水分研究进行得更少^[51~53],且缺乏长期的定位观测资料。

2 国外土壤水分研究现状与进展

世界上 $1/3$ 的地区,处于干旱和半干旱地带,水分缺乏严重困扰着这些地区的经济发展,因此,土壤水分研究已成为当今土壤物理学中最为活跃的领域。世界上一些国家,如美国、澳大利亚、前苏联、巴西、印度以及部分中东干旱区国家对土壤水分投入较多,具有较强的实力。综合国外土壤水分研究情况,可将其土壤水分研究的现状和进展归纳为以下几个方面:

2.1 土壤水分特征曲线的推导

Parker^[54]等利用一次出流法(One-step outflow)^[55]取得水分特征参数和水力传导参数,进而得到这两种曲线,并结合 Van Genuchten 假设的方程^[56],从方程中得到有关参

数建立了数学模型。在此基础上 Kool 和 Parker (1987) 建立了数值水流 SFIT 模型^[57]。Fredlund 和 Xing^[58] 提出了计算土壤水分特征曲线的方程。Fredlund. 等^[59] 提出了根据土壤颗粒分布预测土壤水分特征曲线的方法。Swanson 等^[60] 提出了预测工矿废弃地非饱和土壤水分特征曲线的方法。

2.2 土壤水动力学研究

1911 年 Green 和 Ampt^[61] 基于毛管理论提出了入渗模型, 即 Green-Ampt 模型。Brooks., Corey^[62] 提出了计算非饱和渗透系数的公式 (Brook-Corey 公式); Fredlund 等^[58] 提出了运用土壤水分曲线预测非饱和土壤渗透函数的方法。1973 年, Mein 和 Larson^[63] 提出了将 Green-Ampt 模型应用于降雨入渗领域, 并推导出了相应的修正模型。Green-Ampt 模型主要用于降雨入渗、坡面产流、土壤侵蚀预测预报模型等研究领域, 欧洲的 LISEM 模型和美国的 WEPP 模型中均有应用。长期以来, 较多地用 Richard 模型来定量描述均质土壤的连续水流入渗运动^[64~66] 以及由此推导而来的数学模型^[67~70]。Van Genuchten.^[56] 提出了预测非饱和土壤水力传导度的方程 (Van Genuchten 模式)。Murray, Fredlund 等用 Soilvision Knowledge-based system 模型^[71] 和非饱和渗流模型 (Unsaturated Seepage Modelling)^[72] 来预测非饱和土壤的土壤性质函数: 1) 渗透系数随土壤吸力的变化; 2) 贮水量随土壤吸力的变化; 3) 剪切力随土壤吸力的变化。不少学者还建立了壤中流模型来预测土壤水分运动参数^[73~80]。Roy 等^[81] 用 LEACHM 模型^[82] 预测了草皮覆盖下土壤的水力学特性。Si 和 Kachanoski^[83] 提出了根据连续入渗流中土壤含水量和垂直压力水头随时间变化来预测土壤水力学特性的方法。Mecke 等^[84] 通过对三种森林灰化土的研究, 提出了预测灰色森林土近似饱和和水力传导度的模型。

2.3 土壤水势温度效应的研究

Nimmo 等^[85] 提出了表面张力—粘滞流理论 (STVF, Surface-tension and viscous-flow) 指出温度升高, 土壤水势增加产生的原因是由于温度改变导致土壤水的表面张力和粘滞度发生变化, 从而引起土壤水势发生变化。STVF 理论模式把温度对土壤水势的影响归结于温度影响水的表面张力, 可用下式描述:

$$h_r(\theta) / \sigma(T) = h_{Tre}(\theta) / \sigma_{Tre} = h_s^*(\theta)$$

式中: $h_r(\theta)$ 和 $h_{Tre}(\theta)$ 分别为任一温度及参考温度的土壤水势, $\sigma(T)$ 和 σ_{Tre} 分别为任一温度和参考温度水的表面张力。 $h_s^*(\theta)$ 为规格化函数, 它与含水量有关而与温度无关, 用它可描述任一温度下土壤的持水性。

实际上, 土壤水势随温度的变异并非仅为温度对水表面张力的影响所致, 为弥补 STVF 模式的不足, Nimmo (1986) 提出了 $G_h(\theta)$ 函数模型^[85]:

$$G_h(\theta) = \{ [h_T(\theta) / h_{Tre}(\theta)] - 1 \} / \{ [\sigma(T) / \sigma_{Tre}] - 1 \} \\ (T_{re} > T)$$

$G_h(\theta)$ 值意义为任一温度 (T) 与参考温度 (T_{re}) 土壤水势的相对变量与水表面张力的相对变量之比。 $G_h(\theta)$ 大小反映土壤水势温度效应的程度。

2.4 土壤—植被—大气连续体中水流运动的研究

1966 年, Philip 提出了较完整的关于 SPAC (Soil-Plant-Atmosphere-Continuum) 概念, 认为尽管介质不同、界面不一, 但在物理上都是一个统一的连续体, 水在该系统中流

动过程就像链环一样，互相衔接，而且完全可以用统一的能量指标“水势”来定量研究整个系统中各个环节能量水平的变化，并计算出水分通量。然而，由于水分在 SPAC 系统各个环节中的运动和变化的物理机制还有许多不够清楚的地方，如干土层和大气层中的水汽扩散，液态水到气态水的相变，土面蒸发和叶面蒸腾等，因此许多学者正致力于研究这些过程。

目前，不少人开展了土壤—大气界面水分相互作用的研究，Flerchinger^[86]建立的土壤—植被—大气传输模型 (Soil-vegetation-atmosphere transfer, SVAT) 引起了广泛的关注，其中的水热同步模型 (the simultaneous heat and water, SHAW) 是一个可以模拟多种植物冠层下土壤大气界面的水热迁移的物理过程的模型。Entedhabi^[87]利用土壤的水力学参数建立了土壤圈转化函数模型 (Pedotransfer Function, 简称 PTF)，但大都适用于温带或热带地区土壤^[85,88~92]。

2.5 新测试技术研究

当今土壤水分研究越来越依赖于测试手段的进步。测试手段的研究主要集中在如何快捷、可靠地测定田间土壤含水量和土壤水势方面。

由于传统的土壤水分测量方法（如：烘干法、中子水分仪法和时域反射仪法）的局限，土壤水分时空分布的长期观测资料很少^[93]。连接有自动记录装置的玻璃纤维的电阻传感器 (electrical resistance sensors, ERS) 能够长期自动观测土壤水分含量，但 Seyfried^[94]指出它有两个缺点：1) 不同的传感器差别很大；2) 受土壤性质和温度的影响。因此，他提出了在特定的土壤条件下，用 TDR 校正 ERS 的方法来测量土壤含水量，取得了比较理想的效果。

由于上述问题的存在，缺乏大尺度范围内的土壤水分时空分布格局的信息。最近的研究^[95,96]表明：合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 传感器能够用于表层 5cm 土壤含水量空间分布格局地图的制作。但很多情况下需要研究渗流区土壤含水量分布状况，SAR 就不能满足这一要求，这样，就需要将由 SAR 得到的表层土壤水分含量地图与 SVAT 模型结合起来，以此来获得渗流区连续的土壤水分时空分布格局资料^[93]。即：先用 Sano^[96]和 Moran^[97]介绍的方法，SAR 像点可以转化为适合 SVAT 程序的表层土壤含水量图，运用这些资料，结合其它一些模型参数的输入（气象的、初始数据和小地形数据等），就可以得到任意深度土壤含水量^[93]。

目前，张力计已成为测定土壤水势的常规仪器，但其测值范围仅在 -0.085MPa 以上，因此一些能够间接测定较低水势的方法相继出现，其中应用较多的是电阻传感法 (electrical resistance sensors)。后来，Bouyoucos 和 Mick 首先使用石膏块法测定土壤水势^[43]。

3 展望

总的说来，我国在土壤水分研究工作进展比较缓慢，而且相对落后，其原因是多方面的，但关键在于自己不能研制仪器，仅仅靠进口国外的仪器是很难达到创新目的的，而且国外仪器误差大。所以，今后我国土壤水分研究工作的重点应放在测试仪器和手段的改进，这样才能实现理论和方法的创新。

80 年代以后，我国土壤水分研究，在理论、方法和手段方面都逐步与国际趋同，如：

土壤水势理论已作为土壤水分定量化研究的理论基础,测定土壤水势的方法和仪器日趋完善,也较多地利用各种模型来定量研究土壤水分运动。但是,森林土壤水分的研究工作相对较少,而且大都集中在对北方干旱地区的森林土壤水分的研究,而南方热带和亚热带地区森林土壤水分研究工作很少。所以,今后除了继续加强干旱半干旱地带土壤水分研究工作外,还应该大大加强对森林尤其是南方水分充足地区森林土壤水分的研究,以填补这方面的空白。

在理论方面,今后的发展趋势之一是运用生态学观点和 SPAC 原理,将宏观与微观相结合,探讨土壤水的结构、功能及其生态水文效应。在实践方面,运用数学物理方法和计算机数值技术进行定量研究,并与 3S 技术相结合,对土壤水分动态进行长期定位观测,为合理的管理提供科学的依据。同时,改进测试手段和仪器,尽量减少测量误差,以此来实现土壤水分研究工作的创新性研究。

参 考 文 献

- [1] 王政权,王庆成.森林土壤物理性质的空间异质性研究.生态学报,2000,20(6):945~950
- [2] Blyth.E.M., A.J.Dolman, N.Wood.Effective resistance to sensible and latent heat flux in heterogeneous terrain.O.J.R.Meteorol.Soc., 1993,(19):423~442
- [3] Houser, P.R.Remote sensing of soil moisture using four dimensional data assimilation, Ph.D diss., Univ. of Arizona.Tucson, 1996
- [4] 陈恩凤.土壤含水量对于油桐苗生长的影响.土壤学报,1952,2(1):30~33
- [5] 朱祖祥.土壤水的能量概念及其意义.土壤学进展,1979,(1):1~2
- [6] 庄季屏.四十年来的中国土壤水分研究.土壤学进展,1989,(3):241~248
- [7] 谭孝源.土壤—植物—大气连续体的水分传输.水利学报,1983,(9):1~10
- [8] 雷志栋,杨诗秀,许志荣等.土壤特性空间变异性初步研究.水利学报,1985,(9):10~21
- [9] 雷志栋,杨诗秀等.土壤水动力学.北京,清华大学出版社,1988
- [10] 中国科学院林业土壤研究所.中国东北土壤.北京,科学出版社,1980
- [11] 熊毅,李庆奎.中国土壤(第二版).北京,科学出版社,1987
- [12] 邵明安,李开元,钟良平.根据土壤水分特征曲线推求土壤的导水参数.中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(SPAC中水分运动与模拟研究专集),1991,(18):26~32
- [13] 陈效民, J.Bouma.应用一次出流法结合 SFIT 模型对土壤水力性质的研究.土壤学报,1994,31(2):214~219
- [14] 张光辉,邵明安.用土壤物理特性推求 Green-Ampt 入渗模型中吸力参数 S_f .土壤学报,2000,37(4):553~557
- [15] 钱国胜.田间持水量与土壤容重、机械组成的相关特性.土壤通报,1981,5:12~14
- [16] 靳宝初.三江平原土壤 <0.01 毫米颗粒含量与土壤最大吸湿量之间的关系研究初报.土壤学报,1984,21(2):221~222
- [17] 张建辉,李仲明.四川盆地遂宁组紫色土持水特性.土壤学报,1990,27(3):345~347
- [18] 袁剑舫.土壤水分的蒸发及其影响因素.土壤学报,1964,12(4):174~181
- [19] 杨文治,赵沛伦等.不同湿度条件下土壤水分的蒸发性能和移动规律.土壤学报,1981,18(1):24~37
- [20] 雷志栋,杨诗秀.非饱和土壤水一维流动的数值计算.土壤学报,1982,19(2):141~153
- [21] 杨诗秀,雷志栋.均质土壤一维非饱和流动通用程序.土壤学报,1985,22(1):24~34
- [22] 张思聪,惠士博等.渗灌的非饱和土壤水二维流动的探讨.土壤学报,1985,22(3):209~222

- [23] 裴铁璠等. 森林土壤渗透系数的数学模型. 森林生态系统研究, 1981, II: 42~47
- [24] 李金中, 裴铁璠, 李晓宴等. 森林流域土壤饱和渗透系数与有效孔隙度模型的研究. 应用生态学报, 1998, (6): 597~602
- [25] 邵明安, 王全九. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法 I 理论分析. 土壤学报, 2000, 37 (1): 1~8
- [26] 邵明安, 王全九. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法 II 实验验证. 土壤学报, 2000, 37 (2): 217~224
- [27] 徐绍辉, 张佳宝. 求土壤水力特征的一种迭代法. 土壤学报, 2000, 37 (2): 271~274
- [28] 邵爱军, 沈荣开, 张瑜芳等. 一种确定原状土样非饱和和水力传导度的方法. 土壤学报, 2000, 37 (3): 419~423
- [29] 白锦麟, 张一平等. 几种土壤吸附气态水的特性及其热力学函数的研究. 土壤学报, 1988, 25 (2): 132~138
- [30] 朱祖祥 (主编). 土壤学 (上册). 北京, 农业出版社, 1983
- [31] 张一平等. 温度对土壤水势影响的研究. 土壤学报, 1990, 27 (4): 454~458
- [32] 闵安成, 张一平, 朱铭莪等. 田间土壤的水势温度效应. 土壤学报, 1995, 32 (2): 235~241
- [33] 陈志雄, Vauclin Michel. 封丘地区土壤水分平衡研究 I. 田间土壤湿度的空间变异. 土壤学报, 1989, 26 (4): 309~315
- [34] 吕军, 俞劲炎. 水稻土物理性质空间变异性研究. 土壤学报, 1990, 27 (1): 8~16
- [35] 余优森, 林日暖, 邓振镛等. 人工草地土壤水分周年变化规律的研究. 土壤学报, 1992, 29 (2): 175~182
- [36] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征. 土壤学报, 1998, 35 (1): 10~15
- [37] 邱扬, 傅伯杰, 王军等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析. 生态学报, 2000, 20 (5): 741~747
- [38] 陈志雄. 农田水分平衡. 土壤学进展, 1985, (1): 1~8
- [39] 陈志雄, Vauclin Michel. 封丘地区土壤水分平衡研究 III. 根层边界的水分通量. 土壤学报, 1991, 28 (1): 66~72
- [40] 朱自玺等. 麦田水分平衡的动态分析. 中国农业气象, 1988, 9 (2): 1~3
- [41] 李洪文, 高焕文. 保护性耕作土壤水分模型. 中国农业大学学报, 1996, 1 (2): 25~30
- [42] 冯广龙, 罗远培. 土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究. 生态学报, 1999, 19 (1): 96~103
- [43] 马履一. 国内外土壤水分研究现状与进展. 世界林业研究, 1997, 5: 26~32
- [44] 贺康宁. 水土保持林地土壤水分物理性质的研究. 北京林业大学学报, 1995, 17 (3): 44~50
- [45] 刘永宏, 梁海荣, 赵力天. 大青山水源林不同森林类型土壤水分物理性质的对比研究. 内蒙古林业科技, 1996, (3): 79~88
- [46] 侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 黄土丘陵区湾塌地乔灌林土壤水分动态监测. 水土保持研究, 1996, 3 (2): 57~65
- [47] 崔国发, 曾庆君, 魏秀芝. 落叶松人工林土壤水分物理性质的研究. 林业科技, 1996, 21 (1): 6~9
- [48] 满秀玲, 于风华, 戴伟光等. 森林采伐与造林对土壤水分物理性质的影响. 东北林业大学学报, 1997, 25 (5): 57~60
- [49] 杨澄, 刘建军, 杨武. 桥山森林土壤水分物理性质的分析. 陕西林业科技, 1998, (1): 24~27
- [50] 景芸, 肖火盛. 采伐前后土壤水分物理性质变化的研究. 华东森林经理, 1998, (12): 63~67
- [51] 张秉刚, 卓慕宁. 鼎湖山自然保护区不同林型下土壤的贮水量. 热带亚热带森林生态系统研究, 1989, (5): 1~6

- [52] 张秉刚, 卓慕宁, 骆伯胜等. 鼎湖山亚热带季风常绿林不同林型下土壤水分状况的研究. 热带亚热带森林生态系统研究, 1990, (6): 75~82
- [53] 张秉刚. 鼎湖山土壤的活性铁铝与土壤水分关系探讨. 热带亚热带森林生态系统研究, 1990, (6): 97~101
- [54] Parker J C, J B Kool, and M Th. van Genuchten. Determining soil hydraulic properties from one-step out-flow experiments by parameter estimation: 11. Experimental studies. *Soil Sci. of Am. J.*, 1985, (49): 1354~1359
- [55] Doering E J. Soil-water diffusivity by the one-step method. *Soil Sci.*, 1965, (99): 322~326
- [56] Van Genuchten M Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44 (5): 892~898
- [57] Kool J B and J C Parker. Estimating soil hydraulic properties from transition flow experiments: SFIT user's guide. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1987
- [58] Fredlund D G and Xing A. Equations for the soil-water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Jour.*, 1994, 31: 521~532
- [59] Fredlund M D, G W Wilson and D G Fredlund. Prediction of Soil Water Characteristic Curve from Grain-Size Distribution Curve. Proceedings of 3rd Symposium on Unsaturated Soil, 1997, Rio de Janeiro, Brazil, April 20~22: 13~23
- [60] D A Swanson, G S, G Savci et al. Predicting the soil-water characteristics of mine soils. *Tailings and Mine Waste '99*: 345~349
- [61] Green W H, Ampt G A. Studies in soil physics. I. The flow of air and water through soils. *J Agr. Sci.*, 1911, (4): 1~24
- [62] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap. 3*, Colorado State Univ., Fort Collins, 1964
- [63] Mein R, Larson C. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resource Res.*, 1973, (9): 384~394
- [64] Parlange J Y. Theory of water movement in soils: VIII, one dimensional infiltration with constant flux at the surface. *Soil Sci.*, 1972, (114): 1~4
- [65] Philip J R. and J H Knight. On solving the unsaturated flow equation: III, New quasi-analytical technique. *Soil Sci.*, 1974, (117): 1~13
- [66] White I, D E Smiles and K M Perroux. Absorption of water by soils: The constant flux boundary condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1979, (43): 659~664
- [67] Broadbridge P and I White. Constant rate rainfall infiltration: A versatile nonlinear model: I. Analytical solution. *Water Resour. Res.*, 1988, (24): 145~154
- [68] Warrick A W, D O Lomen and A Ialas. An analytical solution to Richards' equation for a draining soil profiles. *Water Resour. Res.*, 1990, (26): 253~258
- [69] Sander G C, J Y Parlange, V Kuhnel et al. Exact nonlinear solution for constant flux infiltration. *J. Hydrol.*, 1988, 97 (4): 341~346
- [70] Sander G C, I F Cunning, W L Hogarth et al. Exact solution for nonlinear, non-hysteretic redistribution in vertical soil of finite depth. *Water Resour. Res.*, 1990, 27 (7): 529~1536
- [71] Murray D Fredlund, G Ward Wilson and Delwyn G Fredlund. Estimation of Hydraulic properties of an unsaturated soil using A Knowledge-Based System. Proceedings of characterization and measurement of Hydraulic properties of unsaturated porous Media, Riverside, California, 1997
- [72] Murray D Fredlund. Unsaturated Seepage Modeling Made easy. *Geotechnical News*, June 1998, 52~59
- [73] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 1976. 12 (3): 513~522

- [74] Beven K. On subsurface stormflow: Prediction with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows. *Water Resour. Res.*, 1982, 18 (6): 1 627~1 633
- [75] Binley A et al. A physically based model of heterogeneous hillslopes 2. Effective hydraulic conductivities. *Water Resour. Res.*, 1989, 25 (6): 1 219~1 226
- [76] Indelman P. Flow in heterogeneous media displaying a linear trend in the log conductivity. *Water Resour. Res.*, 1995, 21 (5): 1 257~1 265
- [77] Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 1996, 32 (9): 2 697~2 703
- [78] Paleologos E K et al. Effective hydraulic conductivity of bounded, strongly heterogeneous porous media. *Water Resour. Res.*, 1996, 32 (5): 1 333~1 341
- [79] Robinson J S & Sivapalan M. Instantaneous response functions of overland flow and subsurface stormflow for catchment models. *Hydrological Processes*, 1996, (10): 845~862
- [80] Smith R E & Diekkruger B. Effective soil water characteristics and ensemble soil water profiles in heterogeneous soil. *J. Geophys. Res.*, 1996, 32 (7): 1 993~2 002
- [81] J W Roy, G W Parkin and C Wagner-Riddle. Water Flow in Unsaturated Soil Below Turfgrass: Observations and LEACHM (within EXPRES) Predictions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, (64): 86~93
- [82] Wagenet R J, J L Huston. LEACHM: Leaching estimation and chemistry model. Ver. 2. *Water Resour. Inst. Continuum, Center Environ. Res., Cornell Univ., Ithaca, NY*, 1987
- [83] B C Si and R G Kachanoski. Estimating soil hydraulic properties during constant flux infiltration: Inverse procedures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, (64): 439~449
- [84] M Mecke, C J Westman and H Ilvesniemi. Prediction of near-saturated hydraulic conductivity in three Podzolic boreal forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000, (64): 485~492
- [85] Nimmo J R and E E. Miller. The temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characteristics of soils. *Soil Sci. Am. J.*, 1986, (50): 1 105~1 113
- [86] Flerchinger G N. Simultaneous heat and water model of a snow-residue-soil system. Ph.D. diss. Washington State Univ., Pullman, 1987
- [87] Entedhabi D, Rodriguez-Iturrebe and F Castelli. Mutual interaction of soil moisture state and atmosphere processes. *J. Hydrol.* 1996, (184): 3~17
- [88] Mishra S, J C Parker and N Singhal. Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty from particle size distribution data. *J. Hydrol.* 1989, (108): 1~18
- [89] Van den Berg, M E. Available water capacity in strongly weathered soils of South East and Southern Brazil. In Proc. 13th Congresso Latinoamericano de Ciências do Solo.guas de Lindóia. San Paulo, Brazil, 1996
- [90] Van den Berg, M E Klämt, L P van Reeuwijk et al. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferrasols and related soils. *Geoderma*, 1997, (78): 161~180
- [91] Tomasella J and M G Hodnett. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Sci.*, 1998, (163): 190~202
- [92] Javier Tomasella, Martin G Hodnett and Luciana Rossato. Pedotransfer Functions for Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, (64): 327~338
- [93] D C Hymer, M S Moran and T O Keeter. Soil Water Evaluation Using a Hydrologic Model and Calibrated Sensor Network. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, (64): 319~326
- [94] Seyfried M S. Field calibration and monitoring of soil-water content with fiberglass electrical resistance sensors. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, (57): 1 432~1 436
- [95] Engman E T and N Chauhan. Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 1995, (51): 189~198

- [96] Sano E E. Sensitivity analysis of c-and ku-band synthetic aperture radar (SAR) and optical remote sensing in semiarid region. Ph.D. diss. Univ. of Arizona, Tucson, 1997
- [97] Moran M S, D C Hymer, J Qi, et al. Soil moisture evaluation using synthetic aperture radar (SAR) and optical remote sensing in semiarid rangeland, p.199 ~ 203. In Special Symp. On Hydrol., Am. Meteorol. Soc. meetings, Phoenix, AZ. 11 ~ 16 Jan. 1998. Am. Meteorol. Soc., Boston