

电阻率成像法在土壤水文学研究中的应用及进展*

马东豪¹ 张佳宝^{1†} 吴忠东² 许晓辉³

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东淄博 255049)

(3 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博 255049)

摘 要 缺乏有效的监测技术是制约土壤学和水文学中尺度问题研究的主要瓶颈。近年来,以电阻率成像法为代表的地球物理学方法被引入到非饱和带土壤水文过程的研究中来,为解决尺度问题提供了新的强有力的工具。结合土壤电阻率与土壤特性之间的岩土物理学关系,电阻率成像法可以实现对土壤特性或状态的多尺度无损连续监测。阐述了电阻率成像法的基本过程、特征及其在土壤水文过程研究中的初步应用。同时,深入探讨了电阻率成像法应用于非饱和带水文过程研究中存在的问题和未来的应用潜力。

关键词 电阻率成像法;多尺度无损检测;土壤水文过程;土壤电阻率

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

在理论上实现小尺度土壤物理过程和大尺度水文过程之间的有效融合,在技术上实现土壤特性和水文过程的多尺度观测是当前土壤学和水文学共同面临的重要难题。土壤特性的时空变异不仅导致土壤特性参数尺度转换上的困难,而且增加了土壤特性观测的难度。目前以线性假设为前提的尺度提升方法虽然简化了问题,提供了一些可供操作的途径,但很可能与事实相悖。此外,非饱和带水文过程与时空尺度的关系可能是高度非线性的,而过去几十年的水文过程模拟中,控制不同尺度水文过程的机制又被假定是一致的。造成这些困惑的根本原因之一是此前的观测手段很难为这些问题和假设提供有效的多尺度田间观测数据加以验证。近年来,以电阻率成像法为代表的地球物理学方法为这一问题的解决提供了新的工具。

早在 19 世纪末,人们已经注意到土壤电阻率和土壤盐分之间的关系,并利用土壤电阻率的测定来评估土壤盐分状况^[1]。但直至 20 世纪 80 年代末计算机技术获得突破性发展以前,土壤电学特性的应用仍只局限在单点尺度土壤特性指标的

测量。大容量数据存储技术的发展为田间多尺度,多维观测提供了必要条件,高速计算技术的发展则使得大批量地球物理观测数据的高质量解译成为可能。经过近二十多年,尤其是近十年来的快速发展,以土壤电学特性观测为基础,原本用于深层地质勘探的电阻率成像法开始越来越广泛地应用到非饱和带水文过程的研究中^[2]。内容涉及土壤层次信息提取、土壤结构变化探测、土壤特性空间变异分析、土壤水分和溶质运动过程监测,土壤水分和溶质迁移特性确定、植物根系生长和根系吸水研究等方面。相对于传统的水文和土壤物理学观测方法,电阻率成像法具有以下优势:(1)微扰动原位监测;(2)多尺度同步监测;(3)可重复连续监测。这些优势使得电阻率成像法特别适用于土壤特性及土壤水文过程的空间依赖性和尺度转换方法研究。

下面分别就电阻率成像法的原理、监测和反演过程、主要应用、以及应用中存在的一些问题做简单介绍,以促进该项技术在国内土壤水文过程研究中的应用。

* 国家自然科学基金项目(41271237)、国家重点基础研究发展规划项目(973)(2011CB100500)、国家现代农业产业技术体系稳定支持项目(CARS-03)、国家科技支撑计划子课题(2012BAD05B0203)共同资助

† 通讯作者, E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

作者简介: 马东豪(1980—),男,河南南阳人,博士,副研究员,主要从事土壤物理过程研究。E-mail: dhma@issas.ac.cn

收稿日期: 2013-09-08; 收到修改稿日期: 2013-12-27

1 土壤电阻率及其影响因素

物体的电阻率是由其内部可自由移动的电荷决定的。土壤是由固相颗粒、土壤溶液、土壤气体组成的三相系统,但是他们各自的电阻率存在很大差异。土壤气体和固相颗粒的电阻率通常很大,在一些情况下可近似认为是无穷大。由于土壤中固相的成分是不随时间变化的,变化最大的往往是液相,所以土壤的电阻率主要受土壤含水量和溶液盐度的影响。淡水的电阻率通常在 $10\Omega\text{m}$ 以上,但土壤溶液中总不同程度地含有盐分离子,盐分离子的存在又会进一步降低土壤的电阻率^[3]。此外,土壤水的连通性亦会受土壤孔隙结构(孔隙度和孔隙尺寸分布)的影响而使土壤呈现不同的导电特性。受土壤颗粒表面化学特性和结合水的影响,即便是很干的土壤也会呈现不同的导电特性,其电阻率最低可至 $1\Omega\text{m}$,最高可至 $10^5\Omega\text{m}$,主要取决于土壤固相颗粒的矿物成分、结构、粒径分布、阳离子交换量和可浸润度^[1]。盐土的电阻率最低,永久冻土的电阻率最高;比表面积和电荷密度大的黏粒含量高的土壤,电阻率最低,而粗质砂土的电阻率最高;土壤团

聚性强,大孔隙发育,导电介质连通性差的土壤,电阻率大,而小孔隙发育的土壤,电阻率低^[2]。此外,土壤温度的上升也会降低溶液的黏滞性,从而增加离子的活性,降低土壤的电阻率^[4]。田间土壤电阻率是以上因素综合作用的结果^[1],土壤各相之间电阻率的差异,以及影响土壤电阻率的复杂因素增加了土壤电阻率解译的难度,但由于土壤电阻率是在田间相对容易测定的指标,且在特定情况下,土壤电阻率往往受个别因素主导,这为通过土壤电阻率测定预测其他土壤特性提供了可能的途径^[5]。

2 电阻率成像法的原理、过程及其在土壤水文学中的应用

电阻率成像法是通过高密度多维监测获取土壤内部电阻率空间分布的方法。其在土壤水文学中的应用,主要意义在于可以通过土壤电阻率与其他土壤特性之间的关系获得多维多尺度的土壤内部特性和状态信息,进而实现对土壤水文过程的多尺度监测,以及土壤特性参数的预测。电阻率成像法的主要步骤,及其在土壤水文学中的主要应用如图 1 所示,包括:①视电阻率的监测;②由视电阻率

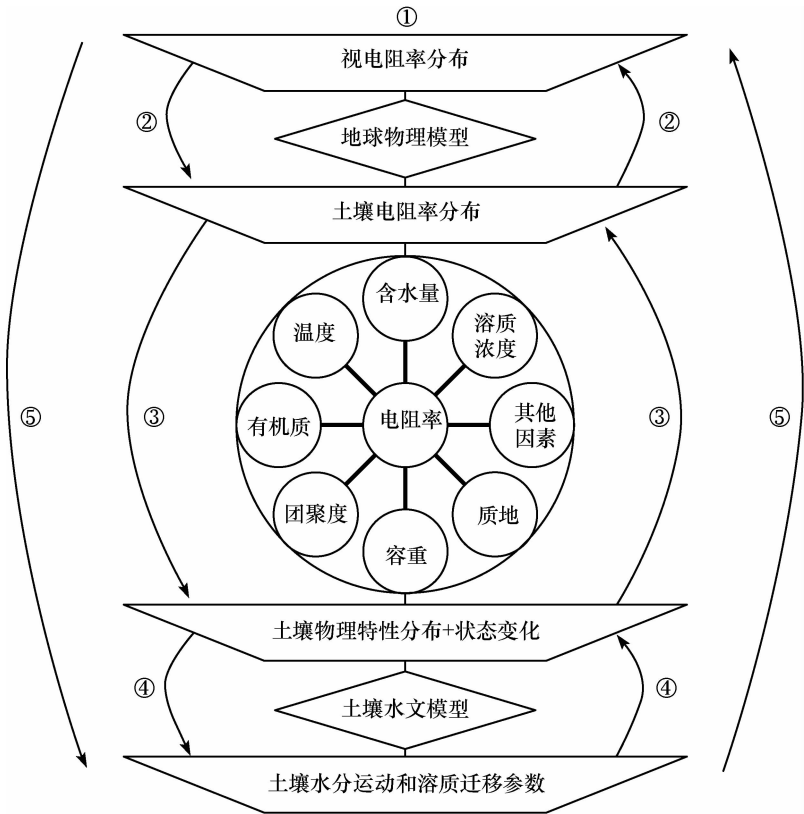


图 1 电阻率成像法监测和反演土壤特性及水文过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ERT monitoring and inverting soil properties and hydrological processes

<http://pedologica.issas.ac.cn>

反演土壤电阻率分布;③基于岩土物理学关系将土壤电阻率转换为具体的土壤特性和状态;④基于土壤特性变化反演预测土壤水分运动和溶质迁移特性参数;⑤基于水文地球物理过程反演预测岩土物理学关系及土壤水分运动和溶质迁移特性参数。下面就监测、反演和应用三个方面加以介绍。

2.1 视电阻率测定原理及影响因素

电阻率成像法的基础是起源于 20 世纪 20 年代的四电极法^[6]。如图 2 所示,测定时需要四个电极(A、B、C 和 D),其中两个电极 A 和 B 用于连接直流电源,另外两个电极 C 和 D 用于测定电压,通过测定的电压、供电电流强度、以及电极排列方式就可以计算土壤电阻率^[7]。如果土壤是均匀电介质,那么测得的电阻率就是土壤的实际电阻率,但实际上土壤无论在横向还是纵向上均存在空间变异,所以由四电极法所获得的电阻率是监测区土壤电阻率的综合反映,称之为视电阻率。视电阻率代表的有效土壤范围与电极之间的相对距离有关,电极间距小,代表的土层就浅,反之则深。

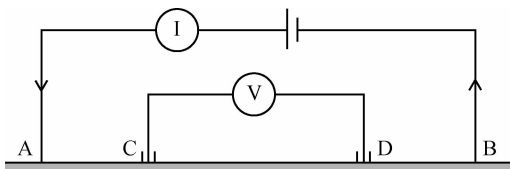


图 2 测定土壤视电阻率的四电极法示意图^[7]
Fig. 2 Schematic diagram of the four-electrode method measuring apparent soil electrical resistivity

由于视电阻率是一定范围内土壤电阻率的综合反映,仅通过有限数量的四电极法测量不足以解译出土壤内部各个位置的真实电阻率。这就需要足

够多的测量点,以获取尽可能多的所监测区域电阻率分布的有效信息,也即电阻率成像法。二维电阻率成像法如图 3 所示,三维成像方法与此类似,只是在其他方向上也进行了同样的二维监测。虽然原理与传统四电极法一致,但电阻率成像法借助飞速发展的电子技术实现了各次测量之间的自动切换和数据采集,将测量结果时间分辨率的主要限制因素由人工操作转向测量本身。电阻率成像法测量的空间分辨率与电极的最小间距有关,间距越小分辨率越高。在垂直方向,电阻率成像法的探测范围受限于电极之间的最大间距,最大间距越大,探测土层越深;在水平方向,测量的范围理论上可通过滚动测量无限延伸。

在田间,影响电阻率成像法测量结果的因素很多,其影响程度依研究目的,当地土壤特性和层次结构的不同也会有所差异。首先,监测区域周围如果存在很强的电场,测量就会受到干扰。如附近大地电场强度大,或有地下电缆经过,或空中有高压输电电缆,或者近表层土壤有极低的电阻率,或土壤内有强导体存在,环境噪声可能会异常高。如果仪器本身的信号与环境噪声之比很小,测量结果就无法反映土壤电阻率的真实水平。其次,电极与土壤之间接触不良,两电极之间的电阻会很大,导致电流很弱,甚至不能注入大地,也会影响测量结果。这种情况通常在土壤很干,或碎石含量较高的土壤中容易发生。此外,不合理的电极间距会使测量结果不足以区分变异源,并且间距的误差也会极大地影响测量结果^[8]。电阻率成像法数据反演或解译的一个基本前提是假定在仪器监测的分辨率以下,土壤是均匀的,其内部各点电阻率是一致的。

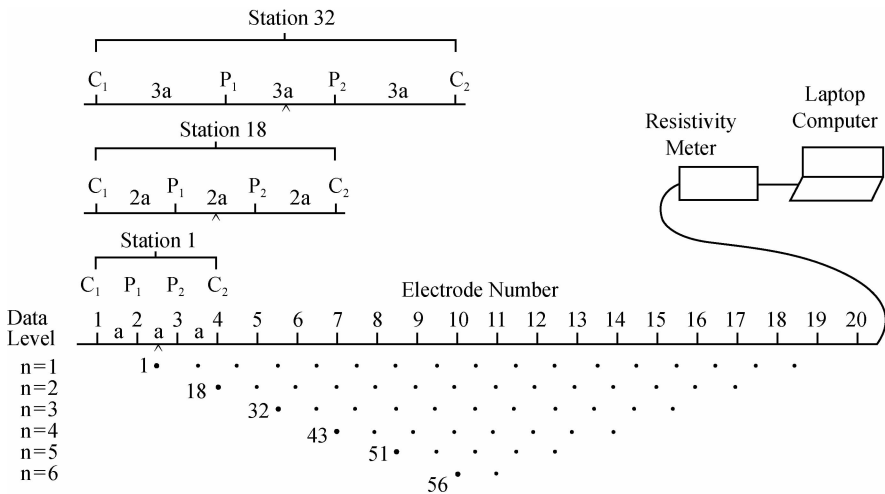


图 3 二维电阻率成像法的电极排列和测量过程^[6]
Fig. 3 Electrode array and monitoring process of two-dimensional ERT
<http://pedologica.issas.ac.cn>

过低的电极间距会增加监测的工作量和数据量,以及后期数据处理的难度,但过大的电极间距会使研究主体的空间异质性得不到有效监测。此外,电极排列方式也会显著地影响测量结果。不同的电极排列方式,其电场分布也不一样,相应的视电阻率对不同类型变异源的敏感性也不相同^[9],选择对变异源敏感的电极排列方式,监测结果会得到更高精度的解译^[10]。例如,Wenner型电极排列方式对其下方的垂直变异比较敏感,而对水平变异不敏感;Dipole-Dipole型电极排列方式则与 Wenner型相反,对水平变异非常敏感,对垂直变异的灵敏度较差;Wenner-Schlumberger型排列则对水平和垂直方向上的变异均具有较好的灵敏度^[6]。最后,电阻率成像法可以进行多维和时间连续性观测,其时间分辨率与单次测量所需要的时间、电极数量,以及土壤干湿状况有关。电极数量多,测定范围广,空间分辨率高,但完成一个时段的测量需要更长的时间。虽然也可以加快仪器本身的测量速度,但数据的不稳定性也会随之增加^[11]。通常假定在单次测量过程中,土壤电阻率分布变化很小,或不发生变化。这对于变化周期较长的土壤物理过程是适宜的,但对于变化剧烈的瞬态水文过程,如大孔隙流等,这一假定是值得商榷的^[11]。在二维和三维成像的选择上也存在同样的问题。二维成像相对简单,时间分辨率较高,但其假定垂直于监测断面的方向上无变异,这在一些情况下可能造成电流不守恒,产生很大的误差^[12]。三维监测能够更真实地反映土壤的空间变异特征,但需要更多的电极和更长的测量时间,数据量也很大,这会极大地增加数据处理的难度^[6-13]。

综上,电阻率成像法监测应当考虑以下几点:(1)信噪比要高;(2)电极与土壤之间要有良好的接触;(3)电极间距应适当,监测样本的代表性尺寸不应大于变异源的特征尺寸;(4)电极排列方式应使视电阻率对所研究的变异源有尽可能高的灵敏度;(5)在进行水文过程的时间连续监测时,应在所监测水文过程的时间和空间分辨率上有所平衡。

2.2 土壤电阻率数值反演方法

由于土壤内部空间变异的影响,视电阻率并非土壤的真实电阻率,即便能够获得电阻率成像法的最佳测量结果,仍需要通过反演才能获得真实的土壤电阻率分布。与其他地球物理方法一样,非线性和病态问题是电阻率成像法数值反演存在的主要问题^[14]。通常情况下,需要用正则化方法来保证解

的稳定性,或利用其他途径获得尽可能详细的前期土壤内部信息(如层次信息、地下水位、土壤水电阻率等)做一些必要的约束,以使反演的结果更符合实际情况^[6]。二维高密度电法反演技术的重要进展来自 Loke^[15-17]的一系列成果,他采用光滑约束的最小二乘法、高斯牛顿法,以及拟牛顿法取得了很好的反演效果。后来,结合其他学者的研究结果,Loke进一步在反演过程中考虑地形地貌影响、土壤结构信息约束、边界约束、区域固定值约束、极值约束、比值约束,以及时间连续性反演中的时间约束,并利用稳健型最小二乘法改善了电阻率对比显著区域的反演结果^[6]。Loke的研究成果已经形成一整套可进行二维和三维高灵敏度电法反演的成熟商业软件(RES2DINV和RES3DINV),获得当前最广泛的应用。其他比较有名的反演软件包括DC2DInvRes和DC3DInvRes^[18-19]等。尽管近二十年来在视电阻率反演方面已经取得如此显著的进步,仍有一些情况下难以获得令人满意的反演结果。即便获得表观上不错的反演结果,但反演过程是否被过度约束,约束是否合理仍一直是关注的热点问题。一个明显的例子是时间连续性反演过程中难以完全消除在地表有浅层入渗^[20]或不完全入渗^[12]情况下出现的异常点。虽然三维反演可以部分消除因土壤三维异质性引起的异常点^[21],但造成异常点最重要的原因之一,相邻土层土壤电阻率差异显著的问题^[20]并未因此就能得到解决。Rings和Hauck^[21]认为,这是正则化方法反演的内在问题,并建议联合水文模型和电学模型来解决这一问题。此外,随土壤深度而下降的灵敏度也会造成反演结果中下层土壤电阻率的不确定性^[10],均质化也会致使反演结果对优势流路径描述的部分失真。虽然也有学者尝试联合不同的地球物理学方法进行土壤特性的反演^[22],以减少反演过程中的不确定性,但与电阻率成像法相比,这些方法本身存在的问题也不少。

土壤电阻率往往不是研究的主要目的,我们真正关注的是土壤电阻率所反映的土壤异质性以及土壤内部所发生的物理过程。近年有一些学者开始联合地球物理过程模型和水文模型,提出先通过实测视电阻率反演土壤电阻率,再通过土壤电阻率反演土壤结构特性或水盐状态,然后通过土壤水盐状态变化反演预测剖面土壤水力特性参数和溶质迁移参数(为区别耦合反演方法,称之为逐步反演方法)^[23]。因为逐步反演方法各步反演过程中的多

解性和不确定性,前一步的预测误差可能会相应带入下一步的预测。为提高土壤水力特性参数及其他土壤特性预测的精度,减少土壤电阻率反演的不确定性,有学者开始考虑在电阻率反演过程中增加水文过程内在机制的约束,用水文和地球物理过程耦合反演的方法来进行土壤电阻率的数值反演^[24]。这种方法的依据是,在土体内任一位置,土壤的岩土物理学关系和水力学特性是唯一的,在特定的初始和边界条件下,土壤水文过程也是确定的,而水文过程决定了特定时间土壤内部的水分和溶质分布状况,进而决定了土壤电阻率分布,以及特定电极排列下的视电阻率。这样,以土壤岩土物理学关系和水力特性的模型参数为可调变量,通过最小化视电阻率或其他一些可测指标的预测误差,可以同时土壤岩土物理学关系和土壤水分和溶质迁移特性,以及土壤水分和电阻率分布做出预测^[25]。由于耦合反演方法直接对土壤特性做出预测,避免了存在问题最多的多维电阻率反演过程,以及同样存在空间变异的田间尺度岩土物理学关系的测定和预测工作,不仅大大减少了数值反演的计算量,而且可以部分地克服逐步反演过程中误差的传播和累积^[25]。此外,原本需要预测的土壤电阻率通过地球物理模型和土壤水文过程建立了联系,使得需要预测参数的数量,以及参数预测的不确定性大为减少。一些学者已经开始尝试在水文模型参数预测中应用耦合反演方法^[25],并取得了很好的效果^[26]。

2.3 土壤电阻率与土壤特性之间的关系(岩土物理学关系)

准确确定土壤电阻率特性与其他土壤特性之间的关系是通过电阻率监测其他土壤特性的基础。如图 1 所示,土壤电阻率是多因素(如:含水量、溶质浓度、温度、质地、容重、土壤颗粒团聚程度、有机质含量等)综合作用的结果^[27]。但在特定情况下,某单一因素的影响占主导地位是通过电阻率监测获知土壤特性和状态的必要前提。即便有其他因素起不可忽视的作用,它们也必须是通过其他监测设备可测定的。

描述它们之间定量关系比较流行的模型是电阻网络模型和混合模型。但前者过于复杂,目前应用最多的仍然是基于等效介质理论的混合模型。混合模型依据土壤各相电学特性的差异将土壤内的导电介质分为两部分:自由态水和结合态水。由于结合态水的电学特性受固相颗粒化学特性的强烈影响,因此,自由态水和结合态水的导电特性不

同,同时结合态水的多少又与土壤中黏粒含量密切相关,所以岩土物理学关系依赖于土壤质地。不仅模型参数会因质地而变,而且模型的复杂性也会因黏粒含量的增加而增加。

描述土壤电阻率与含水量之间关系的代表性公式是 Archie^[28] 根据砂样的实测资料提出的经验公式,

$$\rho = F\rho_w = \phi^{-m}S^{-n}\rho_w \tag{1}$$

式中, F 为土壤孔隙结构因子; ρ 和 ρ_w 分别为土壤和土壤溶液的电阻率; ϕ 为孔隙度,反映土壤容重或压实状况; m 为与土壤颗粒之间的胶结程度有关的常数; n 为与土壤介质特性有关的常数,与土壤孔隙尺寸分布有关; S 为土壤水饱和度,反映土壤水分状况。Archie 公式虽然是基于砂样实验提出的经验方程,在理论上尚没有严格的推导,但已经被证明适用于许多不同的土壤类型^[29-30],以及土壤与土壤溶液电阻率关系的描述^[31],并且作为更为复杂的岩土物理学关系模型的基础而得到广泛应用^[1]。但是上述 Archie 公式可能仅适合描述土壤质地较粗、吸附离子作用相对较弱的土壤。对于质地黏重的土壤,吸附态离子的作用不可忽略,因为吸附态与游离态离子的导电特性不同,用 Archie 公式描述土壤电阻率与孔隙度和含水量的关系则可能出现较大误差。对于这类土壤的岩土物理学关系,目前最常用的方法是用并联电阻来近似描述,即:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F\rho_w} + \frac{1}{\rho_s(\rho_w)} \tag{2}$$

式中, ρ_s 为颗粒表面吸附态离子作用下产生的电阻率,受溶液电阻率 ρ_w 的影响^[1]。事实上,土壤电阻率与土壤特性之间的关系在一些情况下远较上式复杂,关于其他更为复杂模型的详细描述可参见文献^[1]。

此外,温度对土壤电阻率也有显著影响^[4]。如果测量时间较长,或者研究问题的时间跨度较大,土壤电阻率测定时的温度差异很大,为避免对测量结果的错误解释,通常的做法是将测得的电阻率校正至参考温度 25℃ 的电阻率。目前最常用的是比值模型^[32],即:

$$\rho_{25} = \rho_T[1 + \delta(T - 25)] \tag{3}$$

式中, ρ_{25} 和 ρ_T 分别为土壤在 25℃ 和测试温度 T 下的电阻率; δ 为温度补偿系数,通常情况下 $\delta = 0.025\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。关于其他模型,及其精确度的比较可参见文献^[4]。

2.4 电阻率成像法在土壤水文学研究中的应用

受限于传统单点测定方法在测量可重复性、测

量尺度、测量深度和测量效率上的限制,土壤特性时空变异的田间观测和尺度依赖性研究一直是个难题,而电阻率成像法恰恰可以以不同的分辨率同时对水平和垂向的异质性进行无损观测^[33]。目前,电阻率成像法的应用已经从早期的土壤盐分监测扩展至更多土壤特性,甚至是植物根系分布的监测^[34]。比如:Sudha等^[35]采用电阻率成像法研究了深达24m的土壤层质地和结构情况,在钻孔数据矫正的情况下,电阻率成像法具有很好的预测效果,且与其他地球物理学方法相比,具有经济、高效和省时的优点。Seger等^[36]在田间通过10cm电极间距的二维和三维高密度电法观测和反演结果获取了农田耕层厘米尺度上土壤颗粒团聚情况、压实状况、大孔隙等的多维信息,并得到直接监测结果的验证。Seladji等^[37]就压实对四种不同类型农地和林地壤土电阻率影响的研究表明,土壤电阻率受土壤容重影响显著,尤其是在土壤较干的情况下。Basso等^[38]在5.75 m的水平二维断面上用电阻率成像法研究了耕作方式(深耕、中耕和免耕)对土壤电阻率时空变异及土壤特性的影响,很好地分辨出了不同处理下土壤特性的差异。Selian等^[39]的研究结果表明电阻率成像法监测结果对于微小土壤结构变化很敏感,可以粗略反映土壤裂隙发育情况。Rey等^[40]基于碎石和细土之间电阻率的差异,建立了土壤电阻率与碎石含量之间的关系,并利用电阻率成像法的监测结果对土壤碎石含量分布做出了预测。虽然Beresnev等^[41]认为电阻率成像法最好与钻孔结合起来才能取得更好的效果,但同样肯定了电阻率成像法在含碎石土壤研究中的应用前景。也有学者尝试应用土壤电阻率监测反映土壤养分状况,以改善土壤养分管理^[42],或者将土壤电阻率作为作物产量的预测指标^[43]。

在非饱和带,相对于土壤基本物理特性,土壤含水量和溶质浓度的时空变异较大,往往也是影响土壤电阻率最为主要的因素。电阻率成像法目前作为一种重要的监测手段,已经在非均质土壤水文过程的多尺度无损连续监测上得到应用。如:Bes-son等^[44]用电阻率成像法监测田间尺度土壤水分的时空变化,进而获得了土壤水分动态的空间结构,虽然结果显示试验区主要是垂向流,但其指出此方法同样可用于监测侧向流和毛管上升流。Zhou等^[13]的研究表明电阻率成像法在三维土壤水分监测上可以获得与水分传感器相近的预测精度,并进一步评估了不同降雨特征下,优势流在降雨入渗过

程中的作用^[45]。Oberdorster等^[46]进行林地的盐水示踪试验也表明,电阻率成像法不仅可以监测到优势流,并且可以对优势流传输过程的空间变异进行多维成像。French和Binley^[47]通过土壤水分动态的时间连续性电阻率成像法监测证实了奥斯陆机场附近的融雪入渗对地下水的补给过程,并揭示了地下水融雪补给的可能区域。在单点尺度,Battle-Aguilar等^[12]用电阻率成像法成功观测到了圆盘入渗过程中湿润锋的推进过程,这为室内预测土壤水力特性参数的方法在田间的应用清除了一个重要障碍。对于植物根系吸水研究,电阻率成像法同样有应用前景。基于二维土壤水分动态监测,Srayed-din和Doussan^[48]预测了玉米和高粱根系吸水在田间尺度的空间分布特征。Garre等^[49]在大型、未扰动的土柱试验中,用电阻率成像法研究了植物根系形态结构与土壤耗水之间的紧密依赖关系。al Hagrey和Petersen^[50]将地表电阻率成像与钻孔技术相结合,以很高的分辨率监测到了厘米尺度上的三维根区动态。在溶质监测方面,电阻率成像法在野外结合示踪试验已用于监测溶质的动态迁移过程^[51],在室内大型非均质土柱的入渗和溶质迁移试验中,电阻率成像法也已用来进行非均质流和溶质迁移特征的多维观测^[52]。

得益于土壤特性和土壤水文过程多尺度观测能力的提高,电阻率成像法也开始越来越多地用于多尺度土壤水力参数和溶质运移参数的反演预测^[31-32]。已知土壤水文过程中一些状态量的监测结果,依据土壤水文模型可反演获取土壤水力参数和溶质运动参数。但由于视电阻率反演土壤水分和溶质状态变化过程中存在的一些内在问题,一些学者提出了地球物理模型和土壤水文模型的耦合反演技术^[24]。这一方法不仅增加了反演的精度,而且可预测土壤水分和溶质运移参数。关于这一方法已在数值反演一节中提及,此处不再赘述。

3 结语与展望

总体而言,相对于其他土壤特性,土壤电学特性更容易测定,电阻率成像法的引入使土壤电阻率的田间多尺度无损连续监测成为可能。其应用由最初的土壤状态监测,在近十年来已越来越多地融入到土壤水文过程监测的研究中来,无论是室内大型土柱,还是田间原位试验,电阻率成像法均可以以很高的分辨率对土壤内的非均质流进行多维观

测。由于电阻率成像技术主要是依据地质勘探和物探的需求而提出的,在非饱和带土壤特性空间异质性、土壤水文过程监测和参数预测等方面的应用时间不长,诸如高质量监测数据的获取、数据解译质量的提高、有代表性的岩土物理学关系的建立、耦合反演技术的发展等问题亟待深入研究。

电法勘探在我国已经有七十多年的历史,对于高密度电法的研究也在 20 世纪 80 年代即已开始,但其应用目前仍主要局限于水文地质、岩土工程和地球物理勘探等领域^[53-54]。近些年,以电阻率成像法为代表的地球物理学方法应用于解决土壤水文学问题在国际上获得越来越广泛的重视^[55-57],在国内也已有少数单位^[58-59]开始用电法研究土壤非饱和带水文过程,但真正在土壤水文学领域的系统研究尚有待开展。由于相对于传统的单点监测方法,电阻率成像法在多尺度土壤特性和土壤水文过程无损监测中具有无可比拟的优势,相信越来越多的土壤学、水文学、甚至地球物理学的科研工作者会投身于这一领域的研究。借助于这些技术,土壤水文学中尺度问题的研究在未来若干年应能获得新的突破。

参 考 文 献

[1] Friedman S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1/3): 45—70

[2] Samouelian A, Cousin I, Tabbagh A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83(2): 173—193

[3] Mojid M A, Cho H. Wetting solution and electrical double layer contributions to bulk electrical conductivity of sand-clay mixtures. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(3): 972—980

[4] Besson A, Cousin I, Dorigny A, et al. The temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples: Analysis of the existing conversion models and proposal of a new model. *Soil Science*, 2008, 173(10): 707—720

[5] Corwin D L, Plant R E. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1/3): 1—10

[6] Loke M H. Tutorial: 2-d and 3-d electrical imaging surveys. Course Notes for USGS Workshop 2-D and 3-D Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data. Torrs, CT2004

[7] Lowrie W. Fundamentals of geophysics. 2nd ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2007

[8] Oldenborger G A, Routh P S, Knoll M D. Sensitivity of electrical resistivity tomography data to electrode position errors. *Geophysical Journal International*, 2005, 163(1): 1—9

[9] Dahlin T, Zhou B. A numerical comparison of 2D resistivity ima-

ging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 2004, 52(5): 379—398

[10] Loke M H, Wilkinson P B, Chambers J E. Fast computation of optimized electrode arrays for 2D resistivity surveys. *Computers and Geosciences*, 2010, 36(11): 1414—1426

[11] Loke M H, Wilkinson P B, Chambers J E, et al. Optimized arrays for 2D cross-borehole electrical tomography surveys. *Geophysical Prospecting*, 2014, 62(1): 172—189

[12] Batlle-Aguilar J, Schneider S, Pessel M, et al. Axisymmetrical infiltration in soil imaged by noninvasive electrical resistivity. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(2): 510—520

[13] Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 2001, 37(2): 273—285

[14] Kleefeld A, Reissel M. The levenberg-marquardt method applied to a parameter estimation problem arising from electrical resistivity tomography. *Applied Mathematics and Computation*, 2011, 217(9): 4490—4501

[15] Loke M H. The inversion of two-dimensional apparent resistivity data. UK: University of Birmingham, 1994

[16] Loke M H, Barker R D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method. *Geophysical Prospecting*, 1996, 44(1): 131—152

[17] Loke M H, Dahlin T. A comparison of the gauss-newton and quasi-newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 49(3): 149—162

[18] Gunther T, Rucker C, Spitzer K. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - ii. Inversion. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(2): 506—517

[19] Rucker C, Gunther T, Spitzer K. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - i. Modelling. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(2): 495—505

[20] Clement R, Descloitres M, Gunther T, et al. Influence of shallow infiltration on time-lapse ert: Experience of advanced interpretation. *Comptes Rendus Geoscience*, 2009, 341(10/11): 886—898

[21] Rings J, Hauck C. Reliability of resistivity quantification for shallow subsurface water processes. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68(3): 404—416

[22] Doetsch J, Linde N, Binley A. Structural joint inversion of time-lapse crosshole ert and GPR traveltime data. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(24), L24404, doi: 10. 1029/2010GL045482

[23] Koch K, Wenninger J, Uhlenbrook S, et al. Joint interpretation of hydrological and geophysical data: Electrical resistivity tomography results from a process hydrological research site in the black forest mountains, Germany. *Hydrological Processes*, 2009, 23(10): 1501—1513

[24] Lambot S, Slob E C, Vanclooster M, et al. Closed loop GPR data inversion for soil hydraulic and electric property determination. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(21), L21405, doi: 10. 1029/2006GL027906

[25] Hinnell A C, Ferre T P A, Vrugt J A, et al. Improved extraction of

- hydrologic information from geophysical data through coupled hydrogeophysical inversion. *Water Resources Research*, 2010, 46 (4), W00D40, doi:10. 1029/2008WR007060
- [26] Huisman J A, Rings J, Vrugt J A, et al. Hydraulic properties of a model dike from coupled bayesian and multi-criteria hydrogeophysical inversion. *Journal of Hydrology*, 2010, 380 (1/2): 62—73
- [27] Boehm G, Brauchler R, Nieto D Y, et al. A field assessment of site-specific correlations between hydraulic and geophysical parameters. *Near Surface Geophysics*, 2013, 11 (5): 473—483
- [28] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 1942 (146): 54—62
- [29] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology*, 1999, 54 (1/2): 43—53
- [30] Beff L, Guenther T, Vandoorne B, et al. Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using electrical resistivity tomography. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17 (2): 595—609
- [31] Rhoades J D, Manteghi N A, Shouse P J, et al. Soil electrical-conductivity and soil-salinity-new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53 (2): 433—439
- [32] Keller G V, Frischknecht F C. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford: Pergamon Press, 1966: 517
- [33] Besson A, Cousin I, Samouelian A, et al. Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2d electrical resistivity surveying. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79 (2): 239—249
- [34] Rossi R, Amato M, Bitella G, et al. Electrical resistivity tomography as a non-destructive method for mapping root biomass in an orchard. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62 (2): 206—215
- [35] Sudha K, Israil M, Mittal S, et al. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 67 (1): 74—79
- [36] Seger M, Cousin I, Frison A, et al. Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2d and 3d electrical resistivity measurements. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103 (2): 387—398
- [37] Seladji S, Cosenza P, Tabbagh A, et al. The effect of compaction on soil electrical resistivity: A laboratory investigation. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61 (6): 1043—1055
- [38] Basso B, Amato M, Bitella G, et al. Two-dimensional spatial and temporal variation of soil physical properties in tillage systems using electrical resistivity tomography. *Agronomy Journal*, 2010, 102 (2): 440—449
- [39] Samouelian A, Cousin I, Richard G, et al. Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (5): 1319—1326
- [40] Rey E, Jongmans D, Gotteland P, et al. Characterisation of soils with stony inclusions using geoelectrical measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 2006, 58 (3): 188—201
- [41] Beresnev I A, Hruby C E, Davis C A. The use of multi-electrode resistivity imaging in gravel prospecting. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 49 (4): 245—254
- [42] Martinez G, Vanderlinden K, Ordóñez R, et al. Can apparent electrical conductivity improve the spatial characterization of soil organic carbon? *Vadose Zone Journal*, 2009, 8 (3): 586—593
- [43] Corwin D L, Lesch S M, Shouse P J, et al. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, 2003, 95 (2): 352—364
- [44] Besson A, Cousin I, Bourennane H, et al. The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by electrical resistivity measurements. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61 (1): 120—132
- [45] Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Temporal variations of three-dimensional rainfall infiltration process in heterogeneous soil. *Water Resources Research*, 2002, 38 (4), 1030, doi:10. 1029/2001WR000349
- [46] Oberdorster C, Vanderborght J, Kemna A, et al. Investigating preferential flow processes in a forest soil using time domain reflectometry and electrical resistivity tomography. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9 (2): 350—361
- [47] French H, Binley A. Snowmelt infiltration: Monitoring temporal and spatial variability using time-lapse electrical resistivity. *Journal of Hydrology*, 2004, 297 (1/4): 174—186
- [48] Srayeddin I, Doussan C. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. *Plant and Soil*, 2009, 319 (1/2): 185—207
- [49] Garre S, Javaux M, Vanderborght J, et al. Three-dimensional electrical resistivity tomography to monitor root zone water dynamics. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10 (2): 412—424
- [50] al Hagrey S A, Petersen T. Numerical and experimental mapping of small root zones using optimized surface and borehole resistivity tomography. *Geophysics*, 2011, 76 (2): G25—G35
- [51] Koestel J, Kasteel R, Kemna A, et al. Imaging brilliant blue stained soil by means of electrical resistivity tomography. *Vadose Zone Journal*, 2009, 8 (4): 963—975
- [52] Koestel J, Vanderborght J, Javaux M, et al. Noninvasive 3-d transport characterization in a sandy soil using ert: 1. Investigating the validity of ert-derived transport parameters. *Vadose Zone Journal*, 2009, 8 (3): 711—722
- [53] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用. *地学前缘*, 2003, 10 (1): 171—176. Dong H B, Wang C L. Development and application of 2D resistivity imaging surveys (In Chinese). *Earth Science Frontiers*, 2003, 10 (1): 171—176
- [54] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究. *岩土工程学报*, 2004, 26 (1): 83—87. Liu G H, Wang Z Y, Huang J P. Research on electrical resistivity feature of soil and its application (In Chinese). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26 (1): 83—87
- [55] Caterina D, Beaujean J, Robert T, et al. A comparison study of different image appraisal tools for electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*, 2013, 11 (6): 639—657
- [56] Revil A, Karaoulis M, Johnson T, et al. Review: Some low-frequency

quency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20 (4) : 617—658

[57] Loke M H, Chambers J E, Rucker D F, et al. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 95 : 135—156

[58] 周启友. 从高密度电阻率成像法到三维空间上的包气带水文学. *水文地质工程地质*, 2003, 47 (6) : 97—104. Zhou Q Y. Three-dimensional vadose zone hydrology based on high-density electrical resistivity tomography (In Chinese). *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, 47 (6) : 97—104

[59] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究. *岩土力学*, 2007, 28 (8) : 1671—1676. Zha F S, Liu S Y, Du Y J, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil (In Chinese). *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28 (8) : 1671—1676

APPLICATION OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY
TO STUDY ON SOIL HYDROLOGY AND ITS ADVANCE

Ma Donghao¹ Zhang Jiabao^{1†} Wu Zhongdong² Xu Xiaohui³

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

(3 College of Agriculture and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

Abstract Lack of effective monitoring techniques has become a bottleneck in the study on scaling problem in soil science and hydrology. In recent years, some geophysical methods, of which Electrical Resistivity Tomography (ERT) is representative, were introduced into the researches on soil hydrological processes in vadose zones, which provides a new strong tool for solving the scaling problem. Coupled with the petrophysical relationships between soil electrical resistivity and other soil properties, ERT can be used to realize multi-scaled non-destructive continuous monitoring of soil properties or states. In this paper, a review is presented of the basic steps and characteristics of ERT, and its applications to the studies on soil hydrological processes. At the same time, in-depth discussion was conducted of problems in and potentials of the application of the ERT technology to the studies on soil hydrological process in vadose zones.

Key words Electrical Resistivity Tomography (ERT); Multi-scale non-destructive monitoring; Soil hydrological process; Soil electrical resistivity

(责任编辑: 檀满枝)